

Universidad Politecnica de Madrid (UPM)

E.T.S.I.Telecomunicacion

Instituto de Sistemas Optoeletronicos y Microtecnologia

Grupo de Dispositivos Magnéticos (GDM)

Fenomenologia spintronica

Claudio Aroca

Coordinador de Tecnologías

- Breve presentación del iSOM, del GDM y sus circunstancias
- A modo de introducción: Viejos experimentos con spines y corrientes
- Magnetoresistencia gigante y valvulas de spin
- STO's
- Memorias race-track

PERSONAL

Dr. Pedro Sanchez

Dr. Claudio Aroca claudio.aroca@upm.es

Dr. Marco Maicas

Dr. Jose Luis Prieto jose Luis.prieto@upm.es

Dra M.M. Sanz

Dr M Muñoz (CSIC)

3 Graduate students

2 Technicians (mechanical, computers & electronic)

LINEAS DE INVESTIGACION

Magnetic nanodots (sputtering)

Magnetic multilayers

Magnetic sensor and planar magnetic devices

Hybrid devices

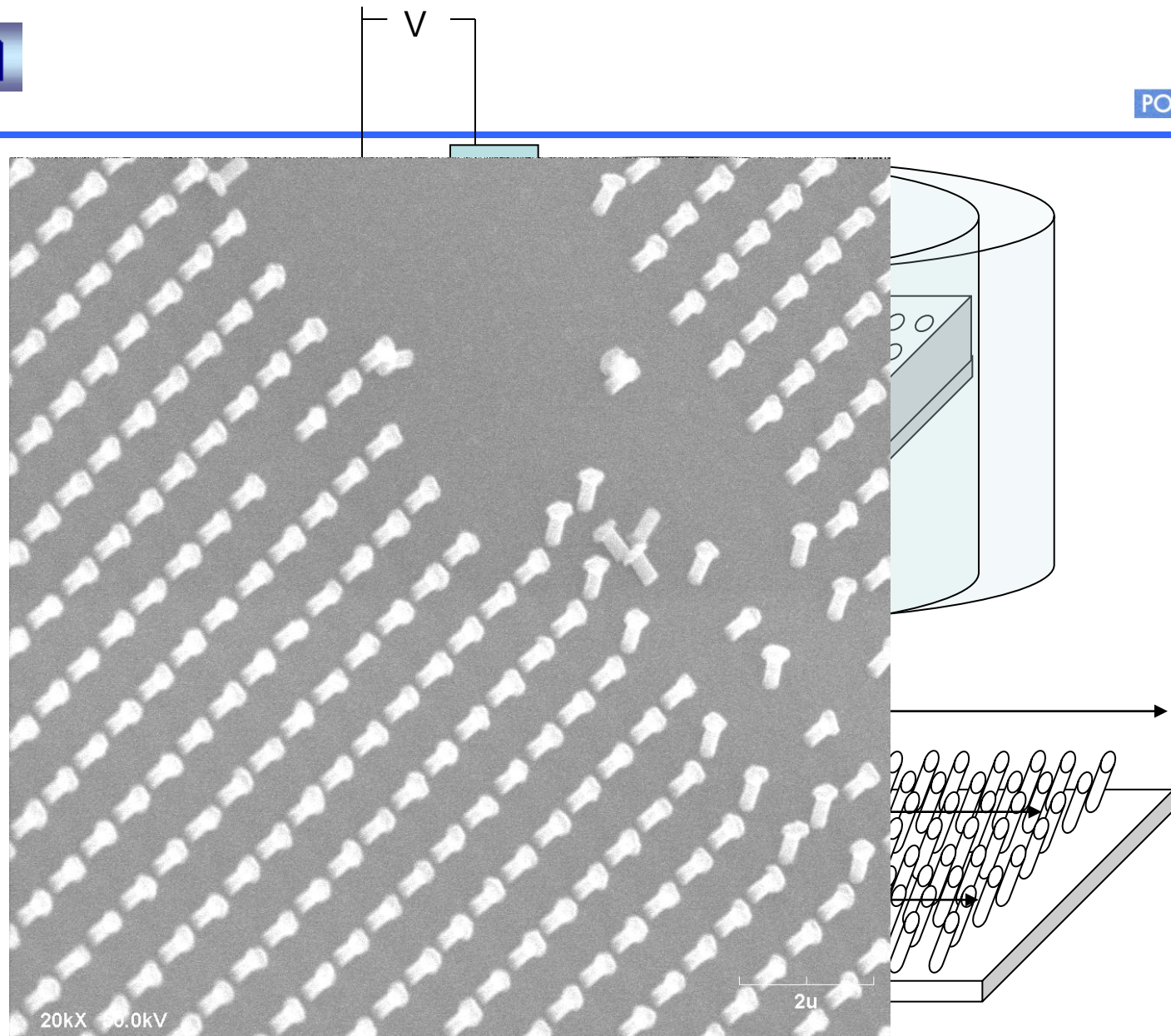
Spintronica

E.T.S. I Telecomunicacion, Ciudad Universitaria

Madrid 28040 Spain

Tel. +343367277 fax + +343367271

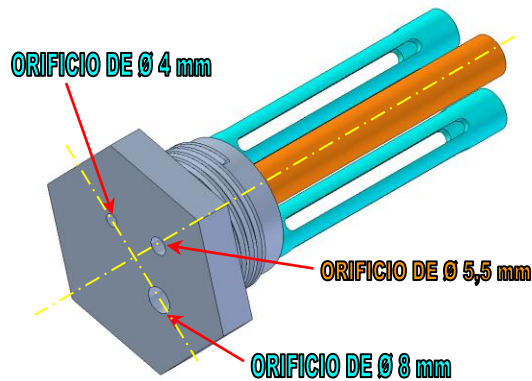
<http://www.isom.upm.es>



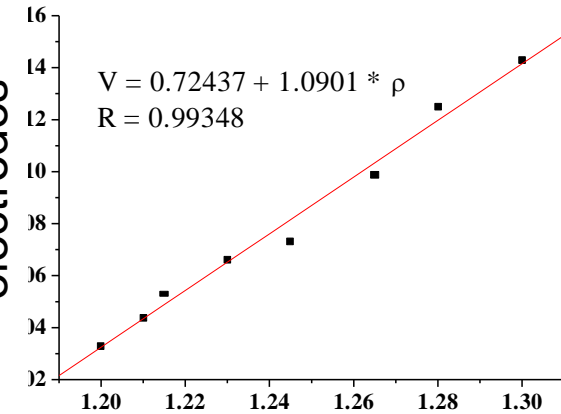
APPLICATIONS (Security systems)

Submarine battery control

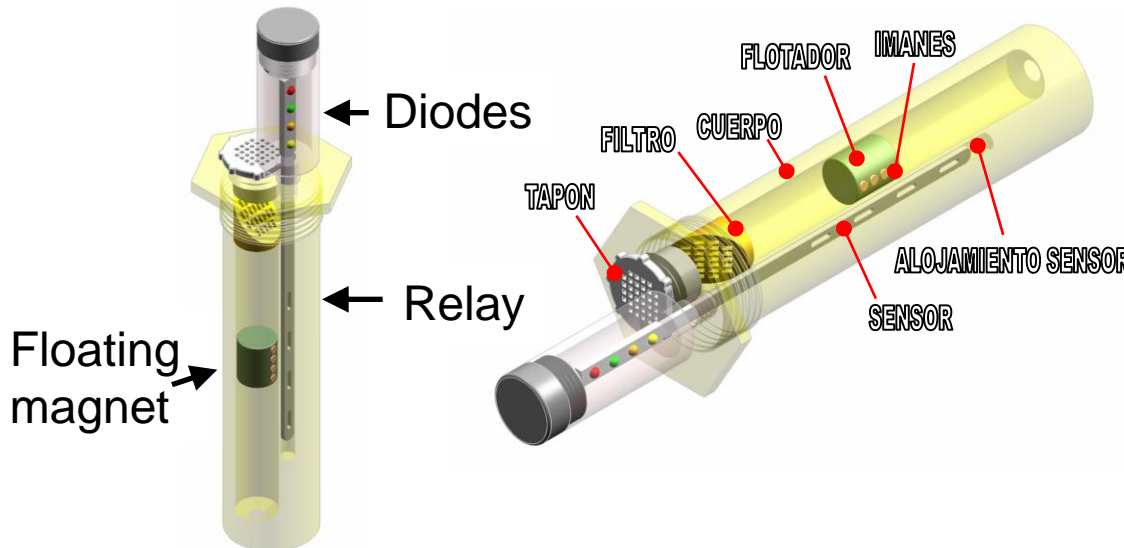
TAPON CONTROL DE CARGA



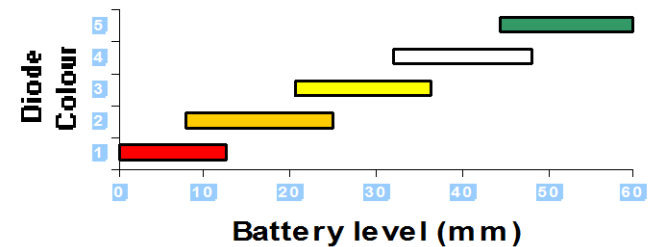
Potential between electrodes



Electrolite density (gr/cm³)



Diode colour as a function of battery level



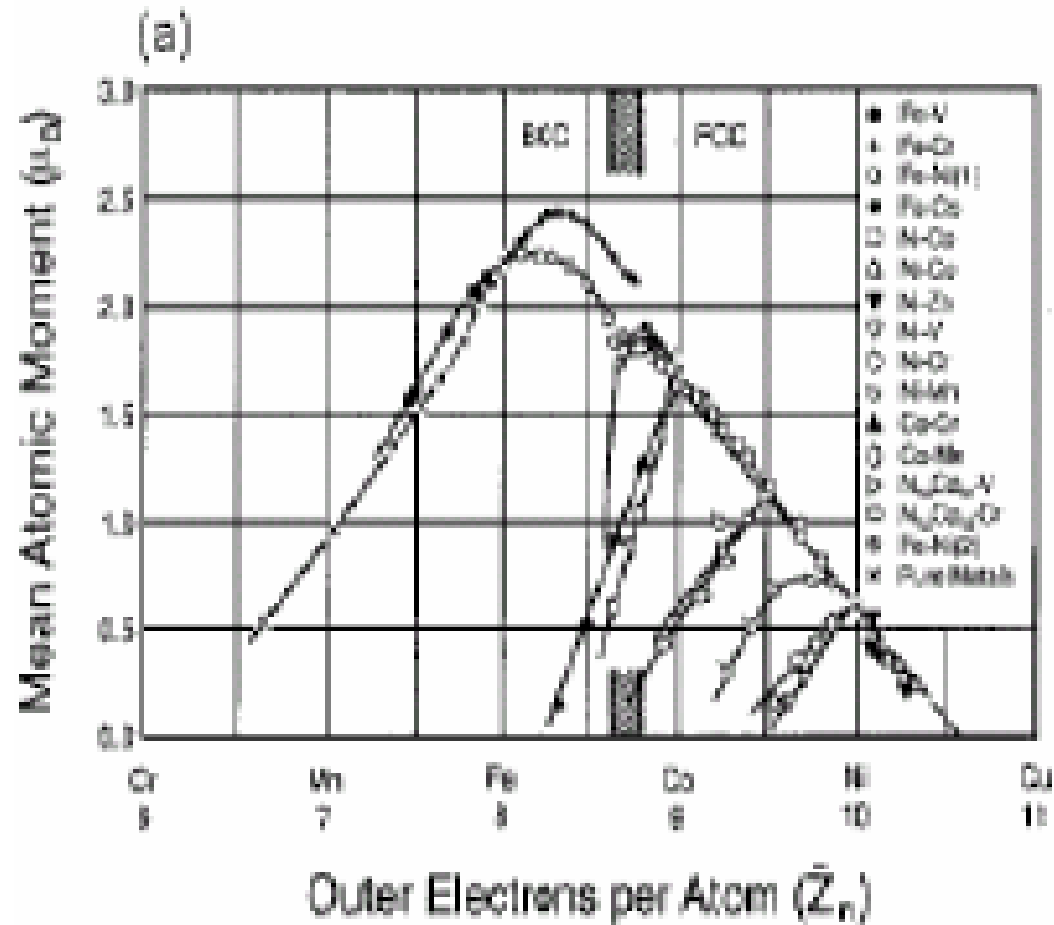
- **ISOM Plan de calidad UPM (auditoria objetivos anual, Evaluación cada 4 años)**
 - **Publicaciones**
 - **Patentes**
 - **Formación de personal**
 - **Proyectos**
 - **Igualdad de la Mujer**
 - **Instalaciones y seguridad**
- **Grupos de Investigación Plan de calidad UPM (, Evaluación anual**
- **ICTS Plan estratégico MEC (Evaluación cada 4 años)**
- **Personal Investigador MEC (Evaluación cada 6 años)**
- **Personal Docente e Investigador CAM (Evaluación cada año)**
- **Evaluación de los proyectos (anual y fin de proyecto + auditorias)**

Protección de Resultados

- **Patente a nivel nacional muy accesible paga la Universidad y da Soporte administrativo y técnico**
- **A los 2 años patente europea si solo hay un organismo es accesible en otro caso es muy cara**
- **Inventores no hay problema,**
- **Propiedad depende de los acuerdos previos con las empresas son muy variados, la universidad se queda con un porcentaje de lo que se reciba**

¿Patentar si o no?

en mi experiencia solo si hay una empresa interesada



3d transition elements	19	K	2	2	6	2	6		1
	20	Ca	2	2	6	2	6		2
	21	Sc	2	2	6	2	6	1	2
	22	Ti	2	2	6	2	6	2	2
	23	V	2	2	6	2	6	3	2
	24	Cr	2	2	6	2	6	5	1
	25	Mn	2	2	6	2	6	5	2
	26	Fe	2	2	6	2	6	6	2
	27	Co	2	2	6	2	6	7	2
	28	Ni	2	2	6	2	6	8	2
	29	Cu	2	2	6	2	6	10	1
		Zn	2	2	6	2	6	10	2

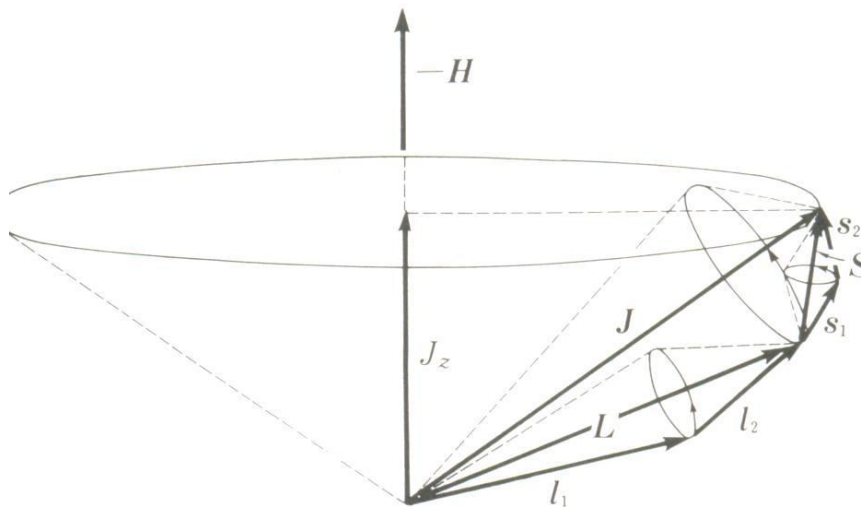


Fig. 3.7. Russell-Saunders coupling.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{ne^2\tau}{m^*}$$

$$m^* \propto \left(\frac{\partial^2 E(k)}{\partial k^2} \right)^{-1}$$

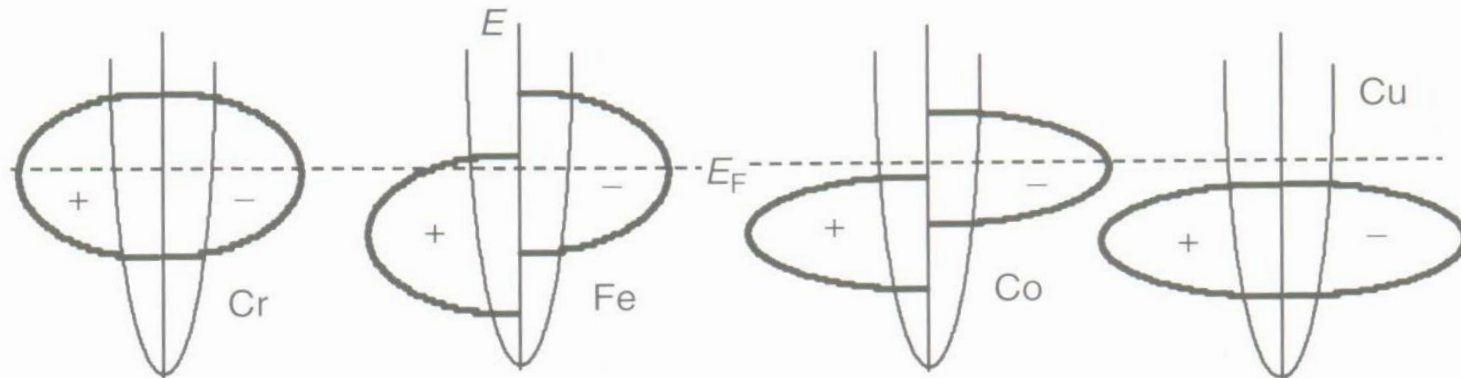
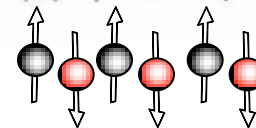
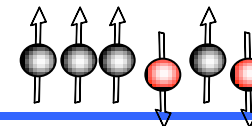


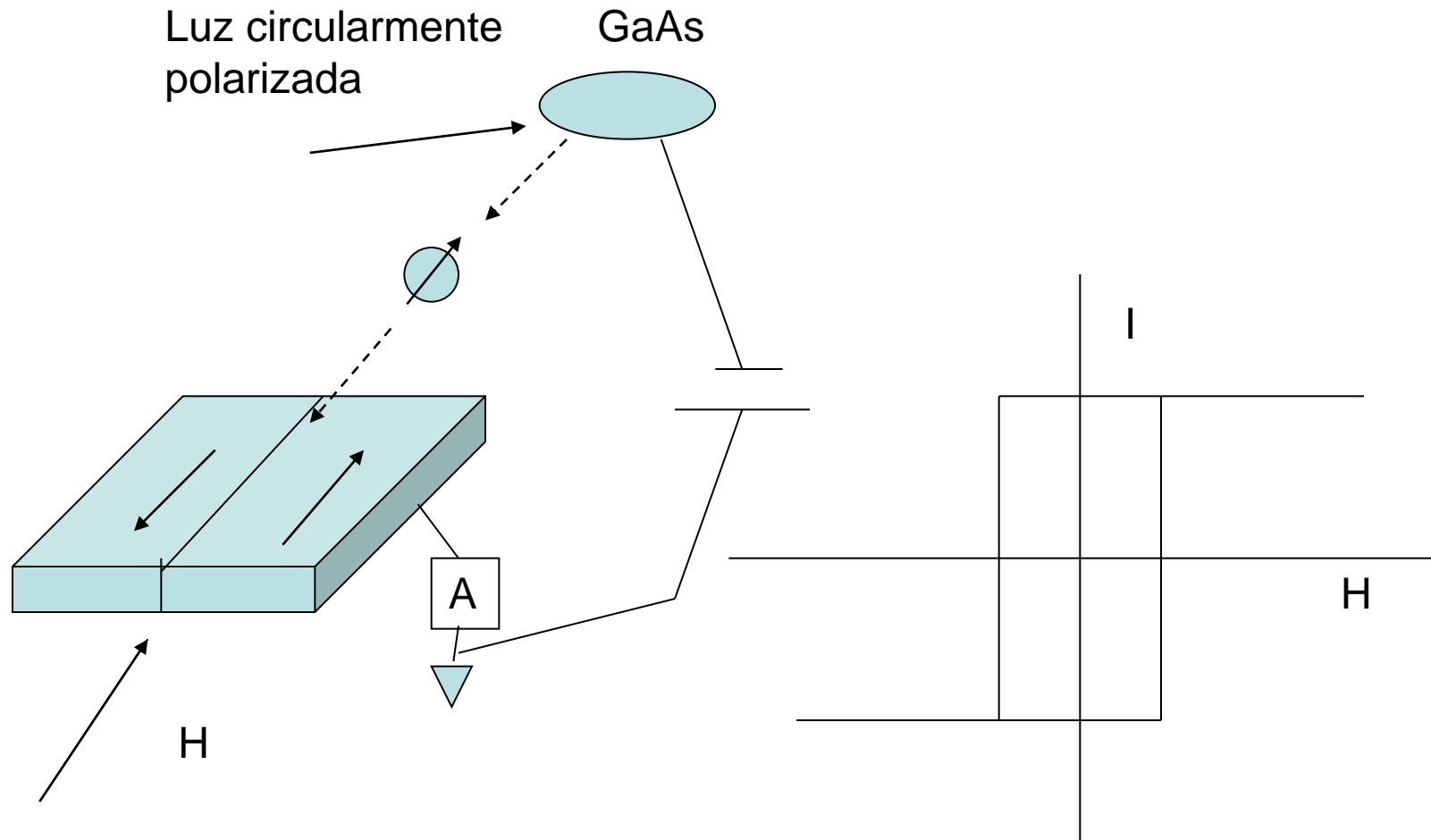
FIGURE 1 Schematic density of states (DOS) of Cr, Fe, Co and Cu. + and – indicate majority and minority spin states, respectively, identical to up (\uparrow) and down (\downarrow) spin, respectively, in uniformly magnetized materials.

Metal no magnético: 50% e^{\uparrow} y 50% e^{\downarrow}



Metal **Magnético**: Corriente polarizada de spin





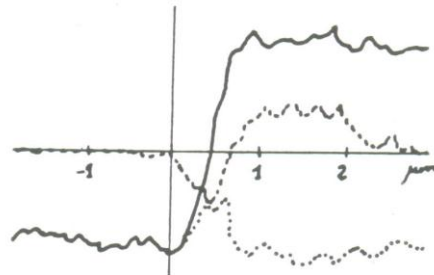
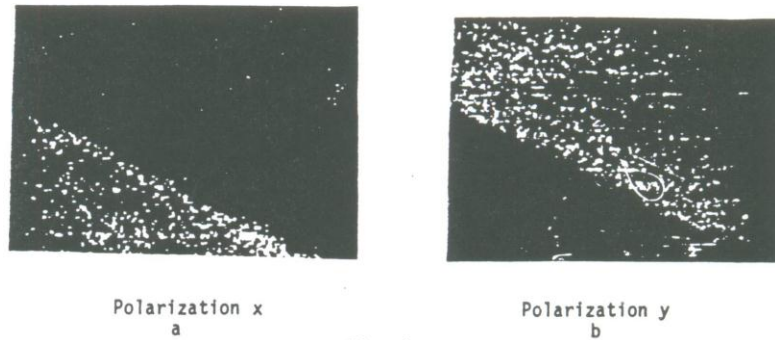


Fig. 5

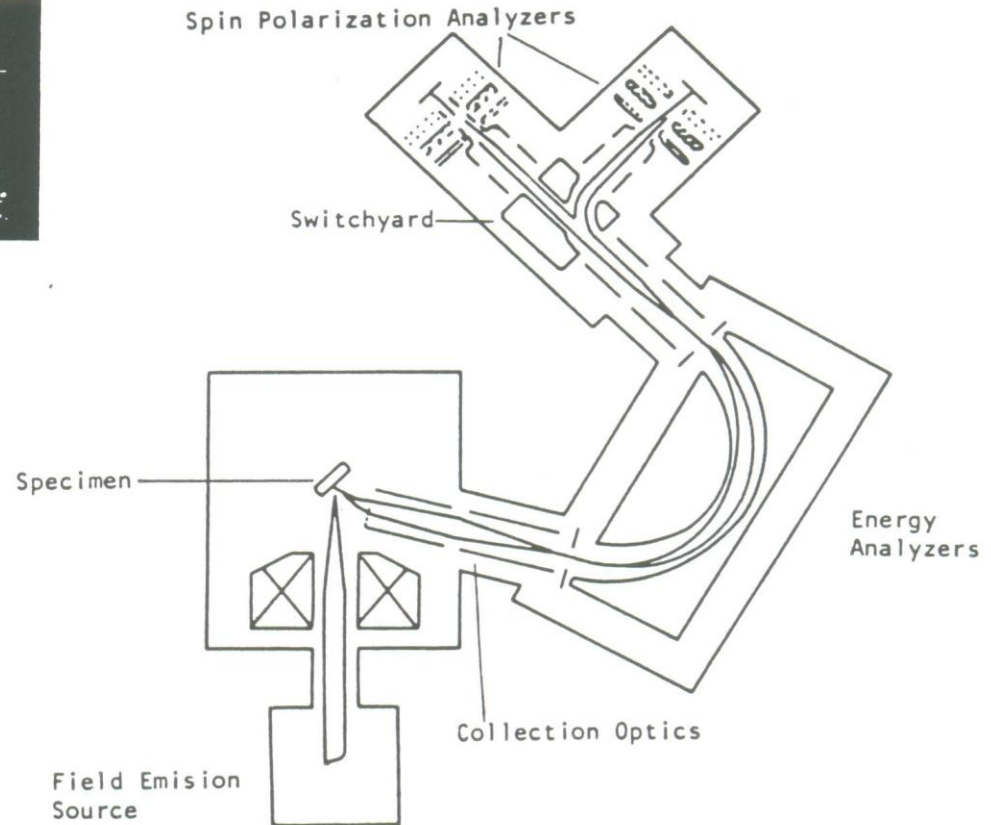
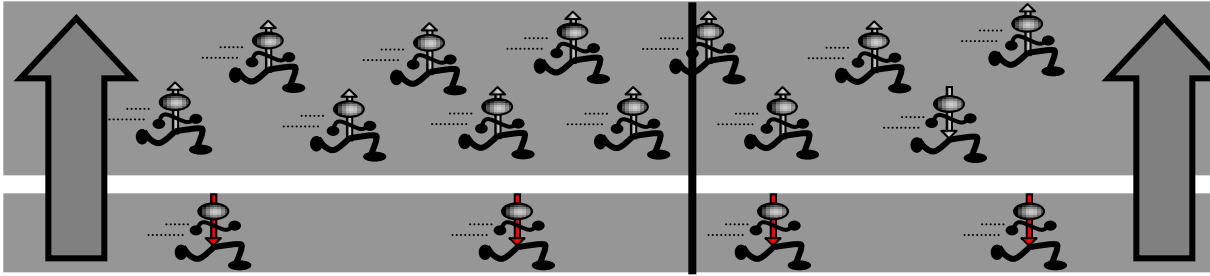


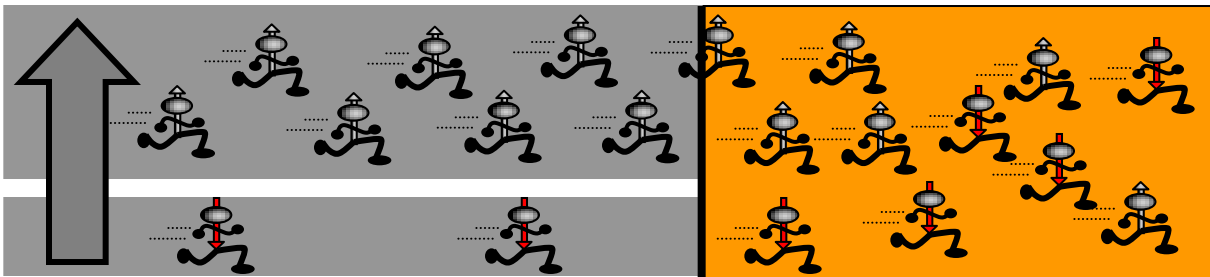
Fig. 1

[J. Unguris](#), G. Hembree, C. Aroca, [R. J.](#)
and [D. T. Pierce](#)
Magnetic Properties of Amorphous Metals

Spin Diffusion Length



Una interfaz entre dominios paralelos en un material ferromagnético, no produce ninguna MR

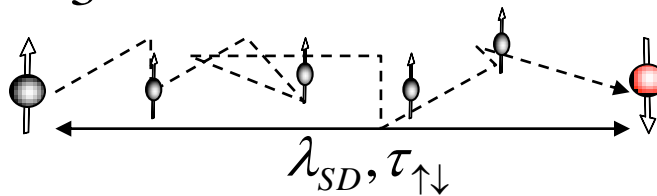


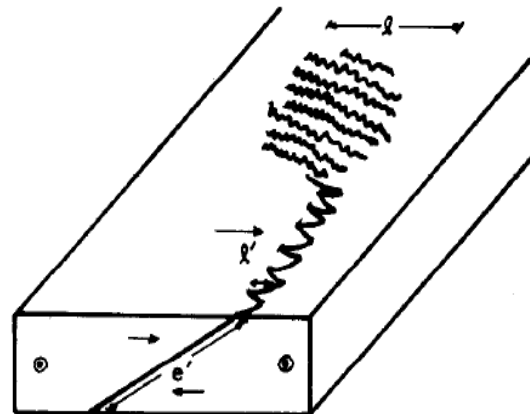
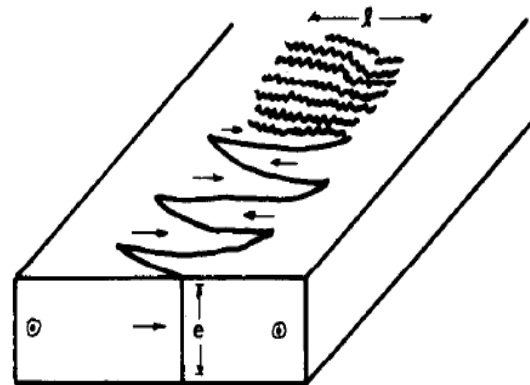
Un metal no ferromagnético trata igual a ambos spines. Después de una distancia λ_{SD} la infomación del spin desaparece.

$$\lambda_{SD} = \sqrt{\frac{\lambda v_F \tau_{\uparrow\downarrow}}{3}}$$

Un poco más de spin-up = *Spin Accumulation*

= pequeño momento magnético neto





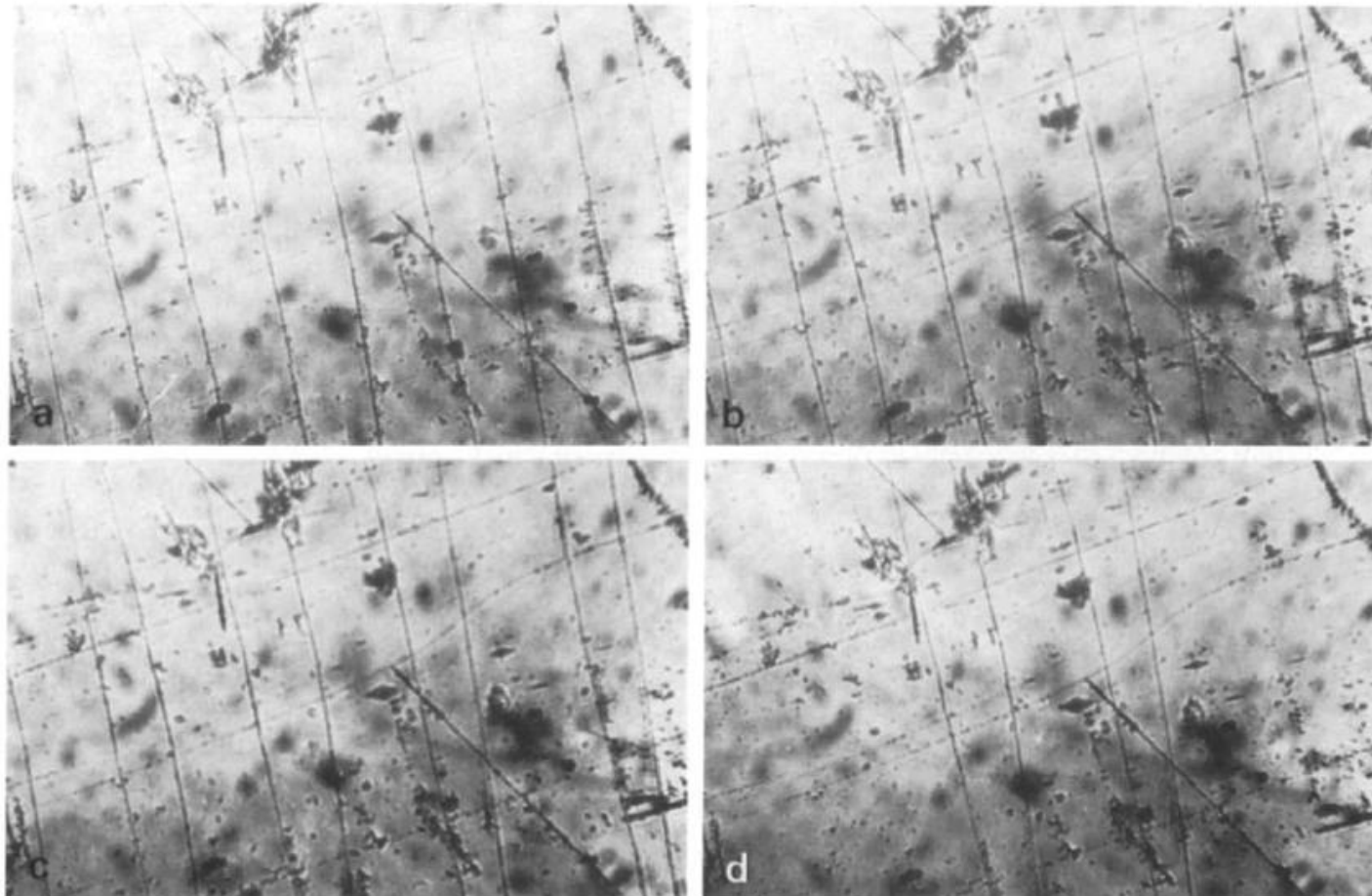
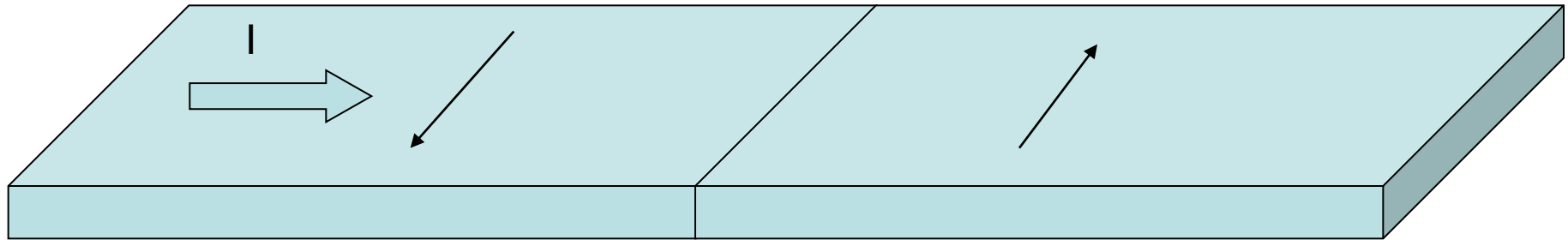


Fig. 4. Displacement of the Bloch wall under the action of a current. $I =$ (a) 0, (b) 30, (c) 40 and (d) 50 mA.

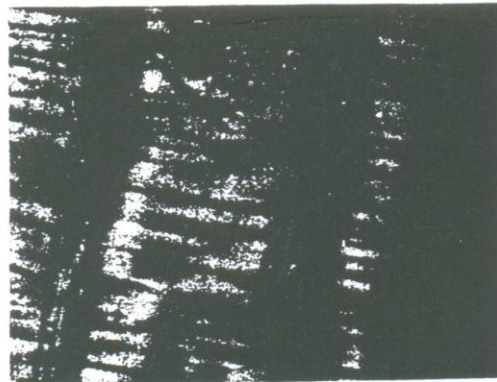
E. LOPEZ, C. AROCA P. SANCHEZ

JMMM 1983



L. Berger

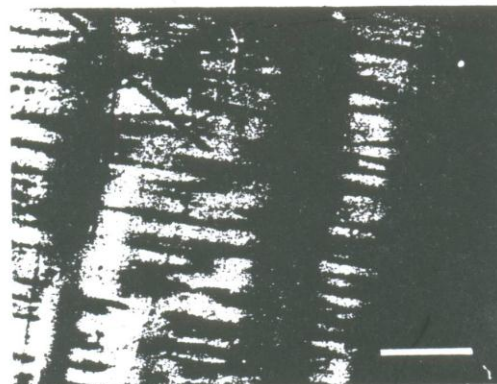
Pys Let (1973)



wall

wall

$I = 0$

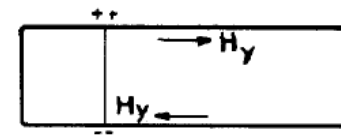


wall

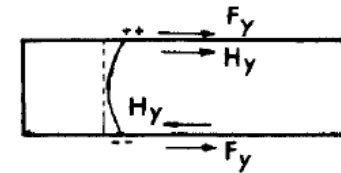
wall

$I = 110 \text{ mA}$

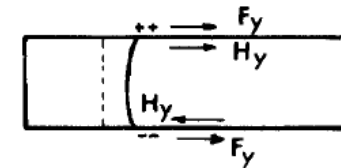
E. LOPEZ, C. AROCA P. SANCHEZ
JMMM 1980



a



b



c

Schematic representation of the current effect on the walls.

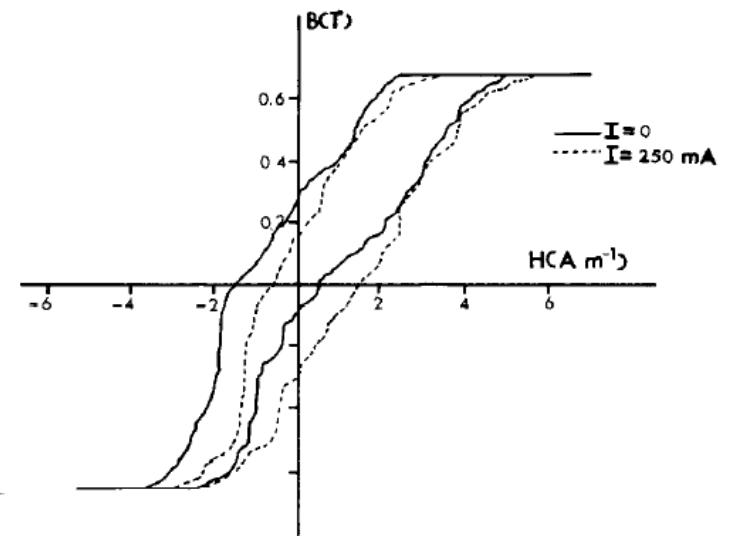


Fig. 9. Effect of the current on hysteresis loop when the sample is subjected to tensile stress ($\sigma = 1.8 \times 10^8 \text{ Nm}^{-2}$).

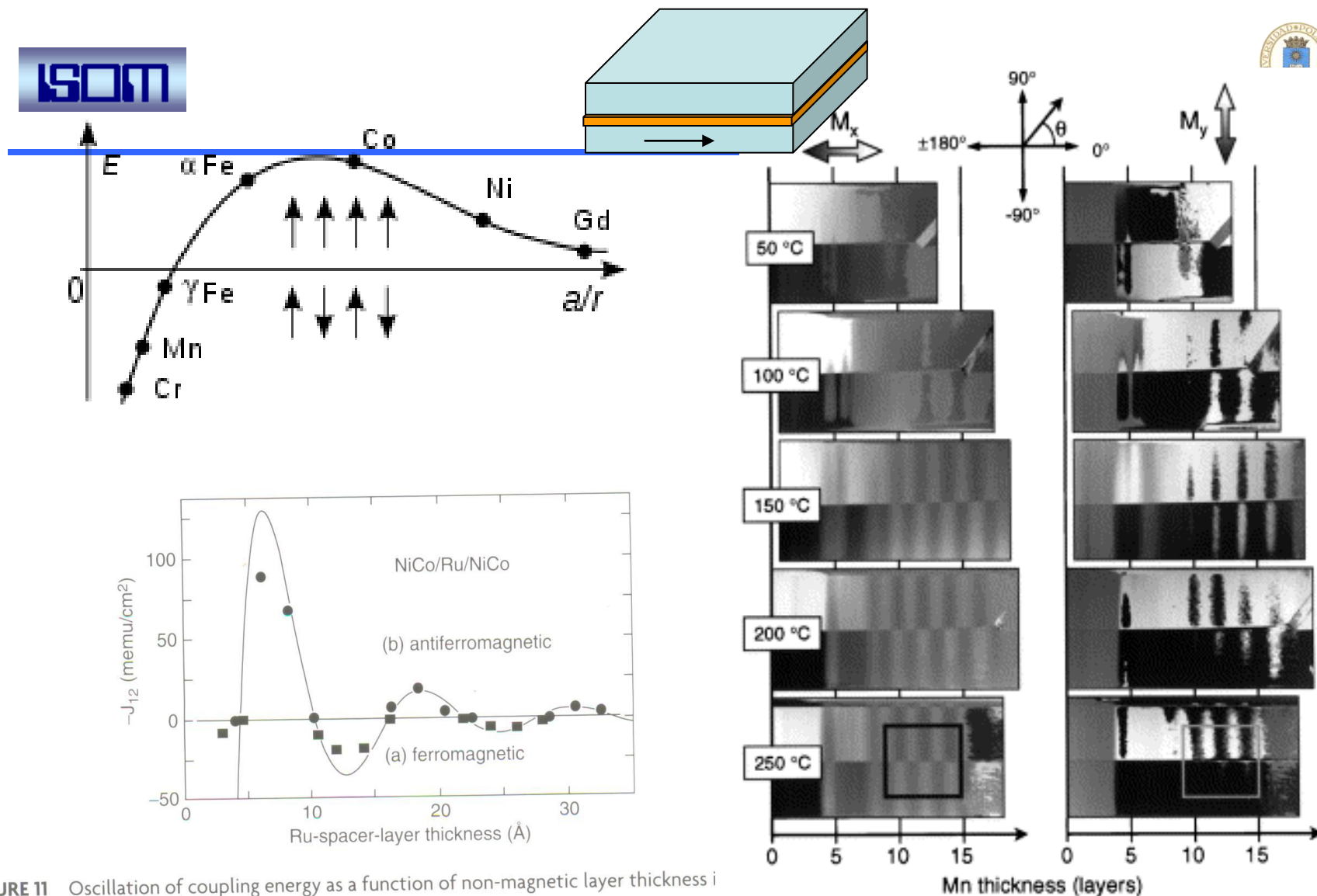
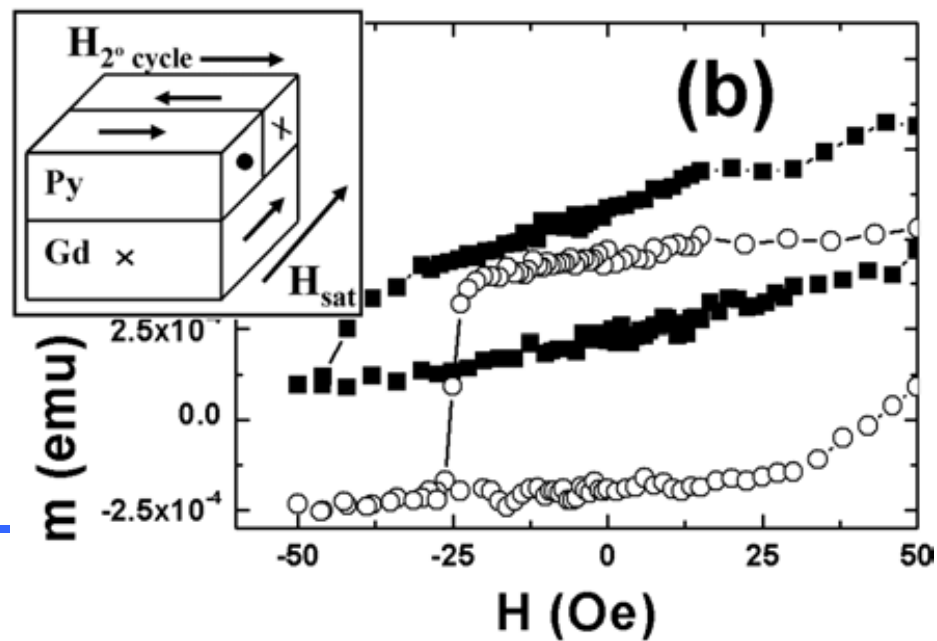
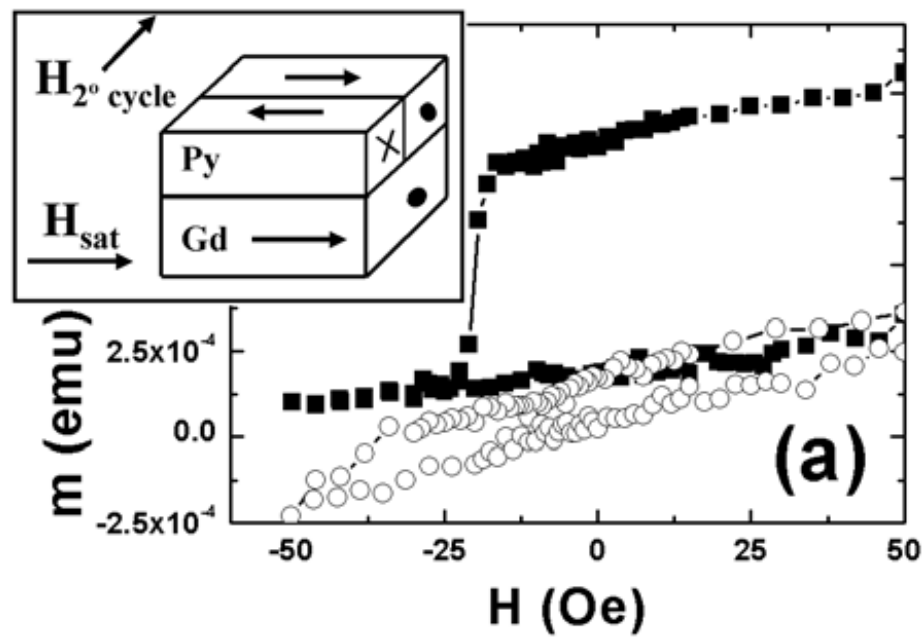
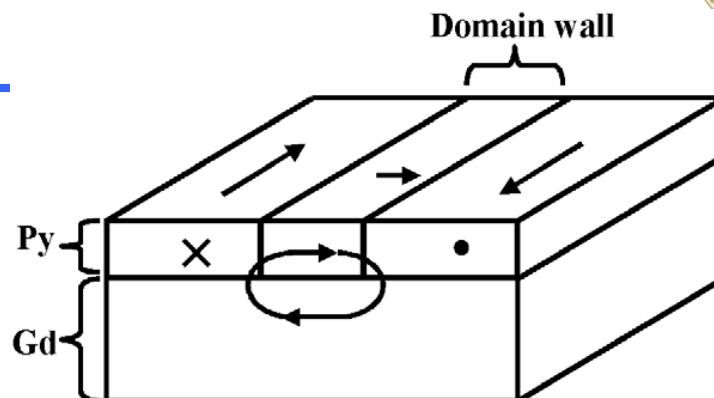
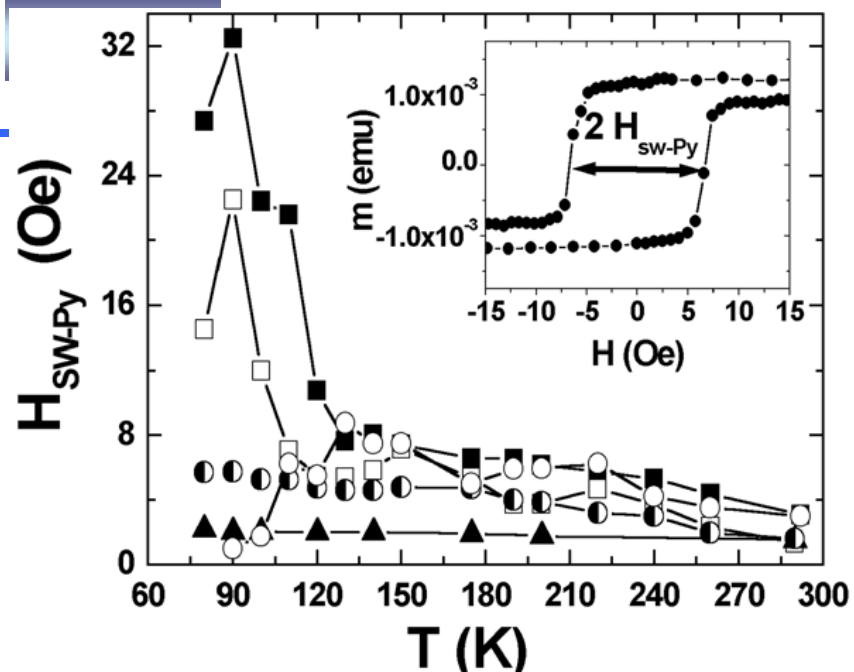
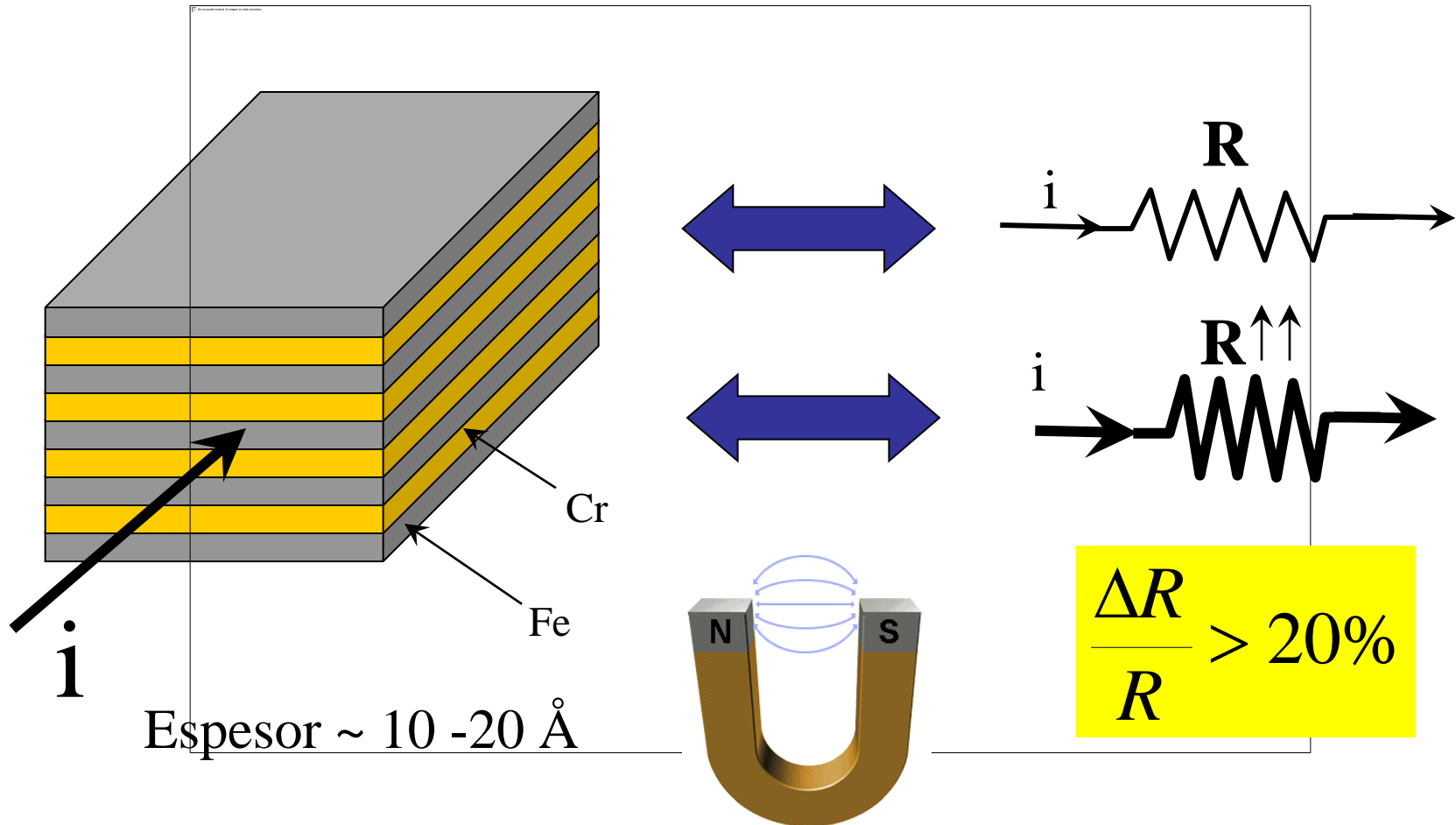
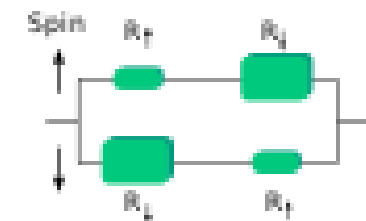
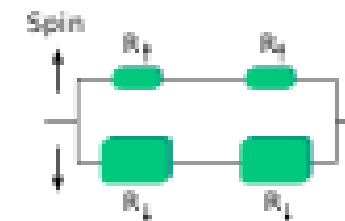
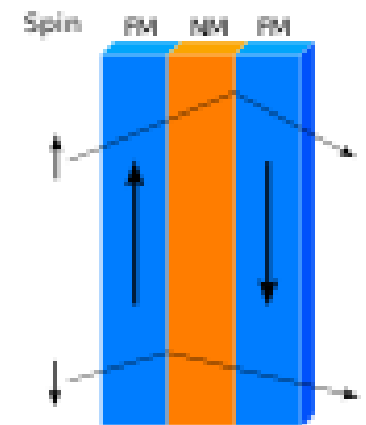
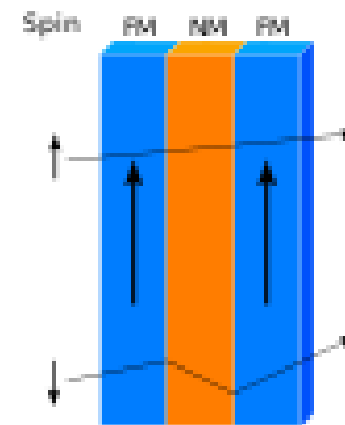
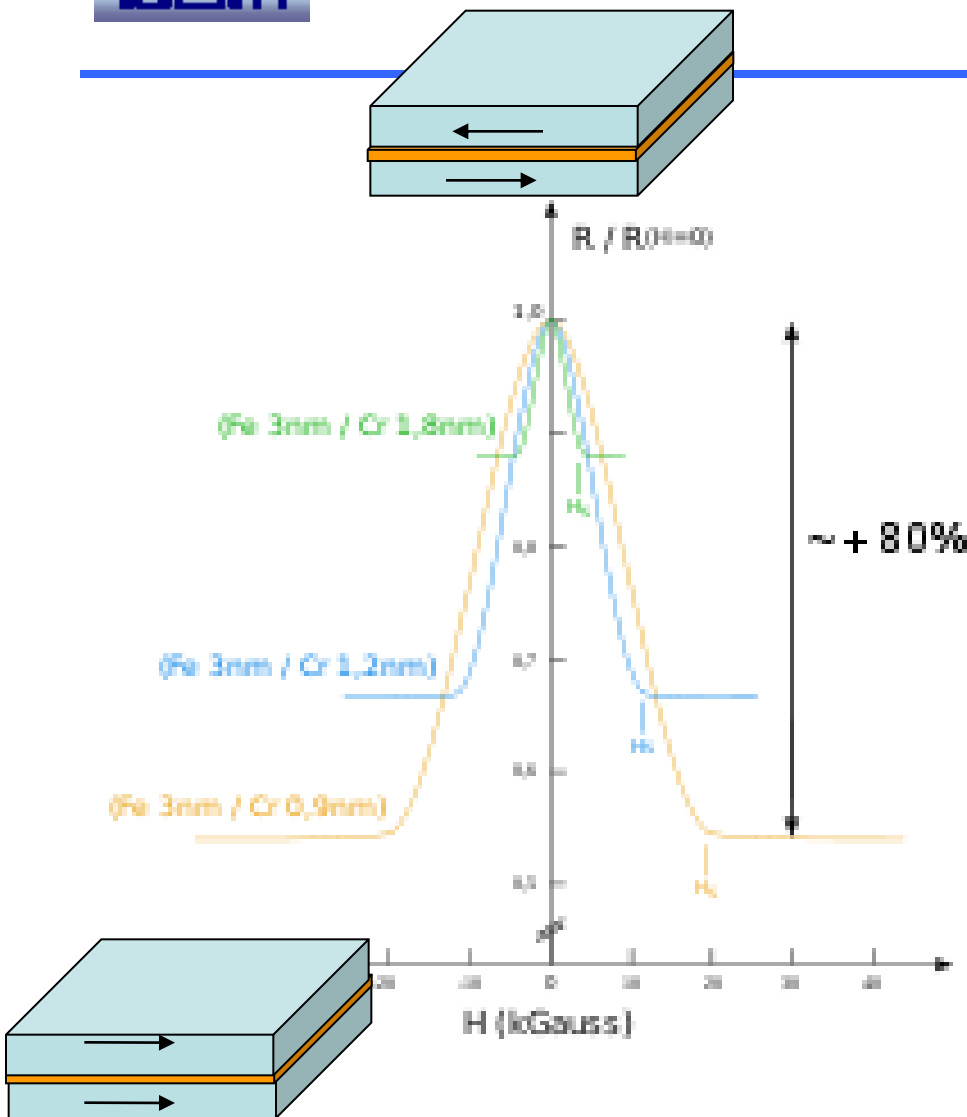


FIGURE 11 Oscillation of coupling energy as a function of non-magnetic layer thickness in Ru/NiCo multilayers [51].

Tulchinsky DA, Unguris J, Celotta RJ







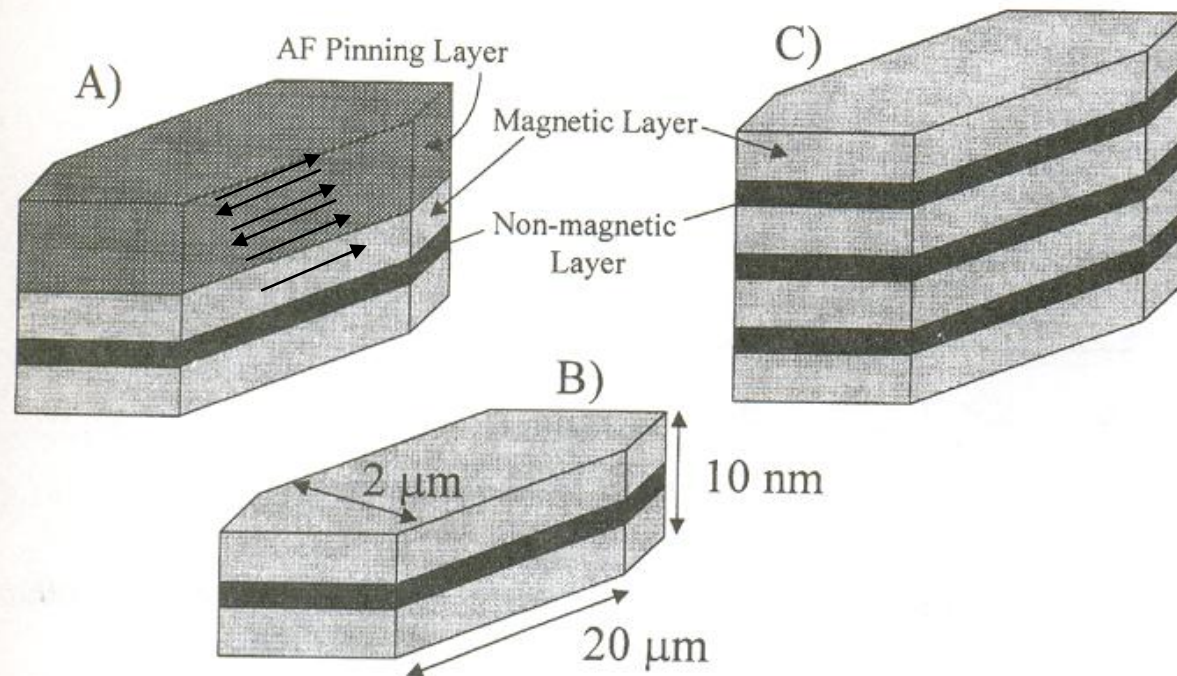
Albert Fert



Peter Grünberg



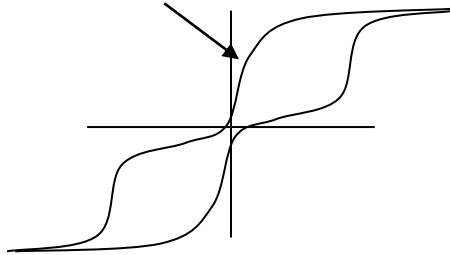
PREMIO NOBEL 2007



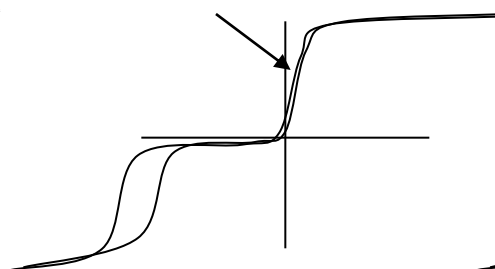
22 Cross sections of common GMR structures: (a) spin valve, (b) sandwich, and (c) multilayer.

SPIN VALVES: Transición a $H=0$ (Synthetic Spin-Valves)

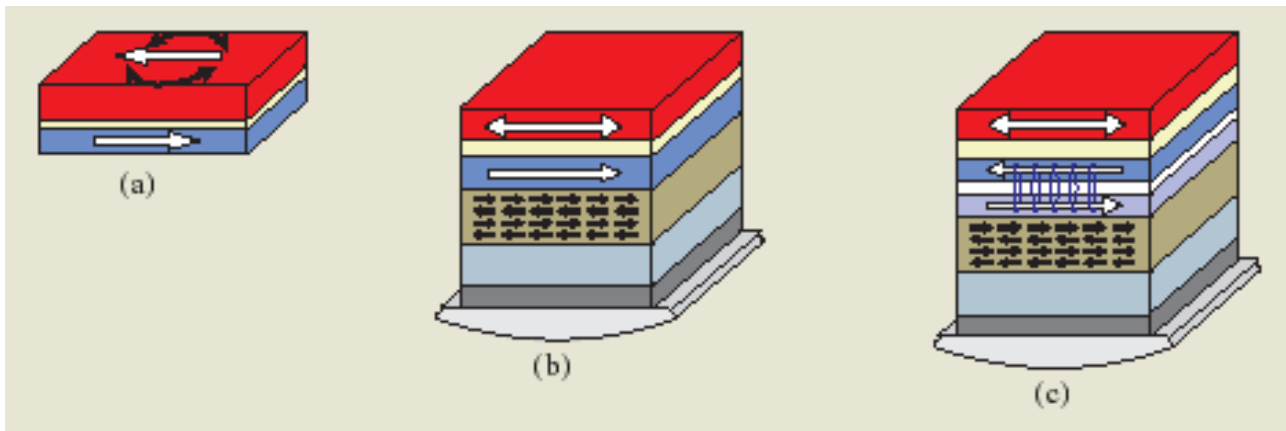
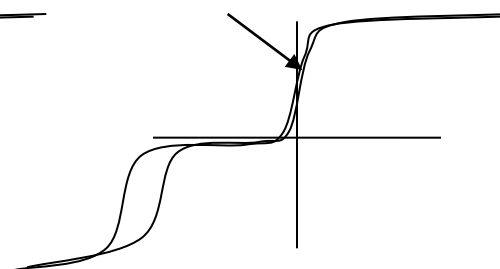
Transición a $H \neq 0$



Transición a $H \sim 0$



Transición a $H=0$



1991

Stuart Parkin



Inventa la “Spin-Valve”

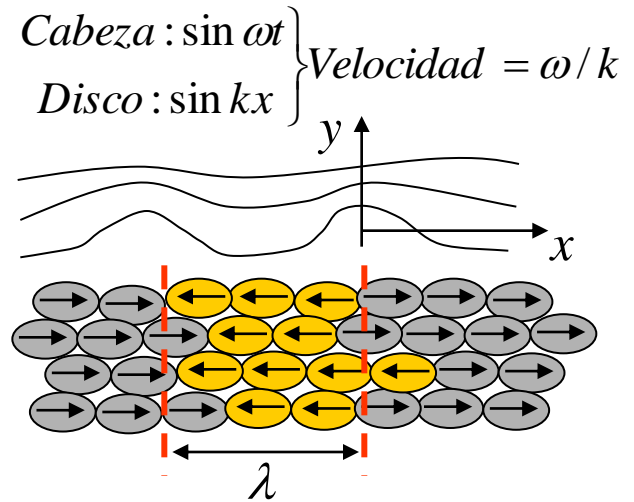
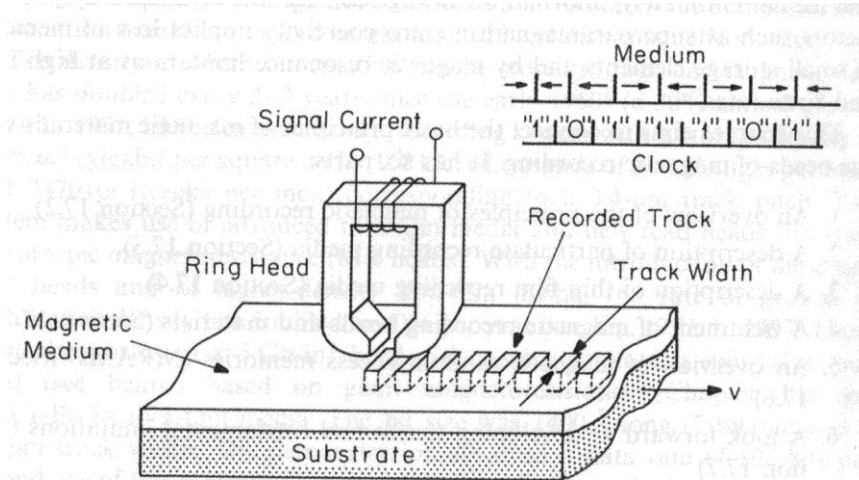
$$\frac{\Delta R}{R} \approx 2\%$$

Pero la transición es a
H=0!!

Compartió con Fert y Gr mberg:

American Physical Society's International New Materials Prize (1994)European Physical Society's Hewlett-Packard Europhysics Prize (1997)1997: Spin –Valve como
cabeza lectora100% Crecimiento anual
1997 (2.4 Gb/sq-Inch)
2007 (70 Gb/sq-Inch)

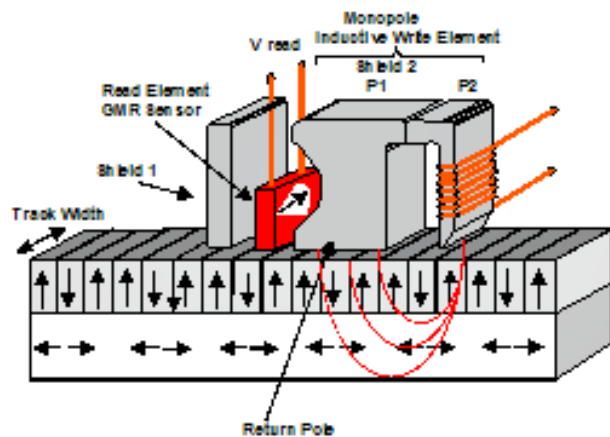
Grabación Magnética

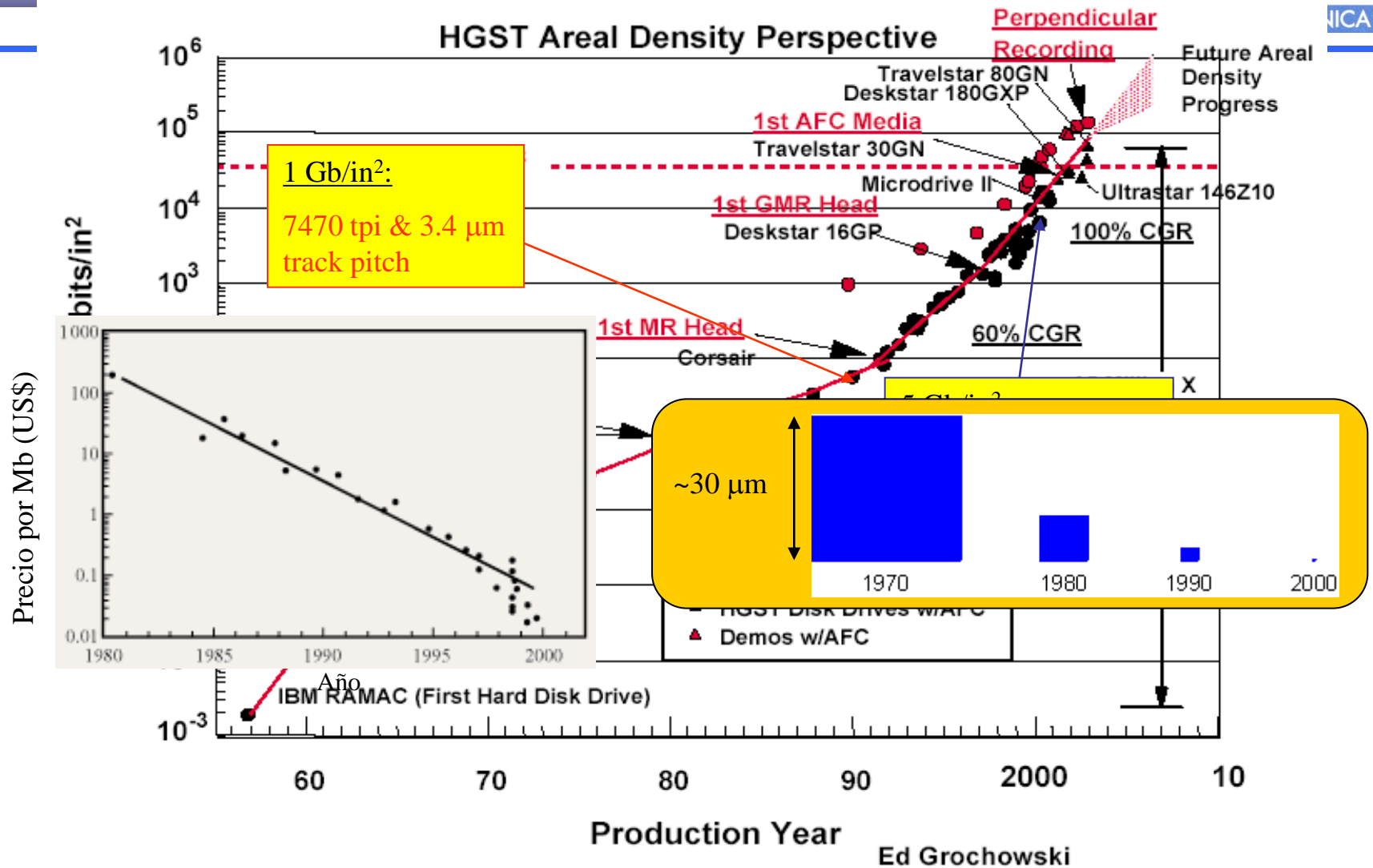


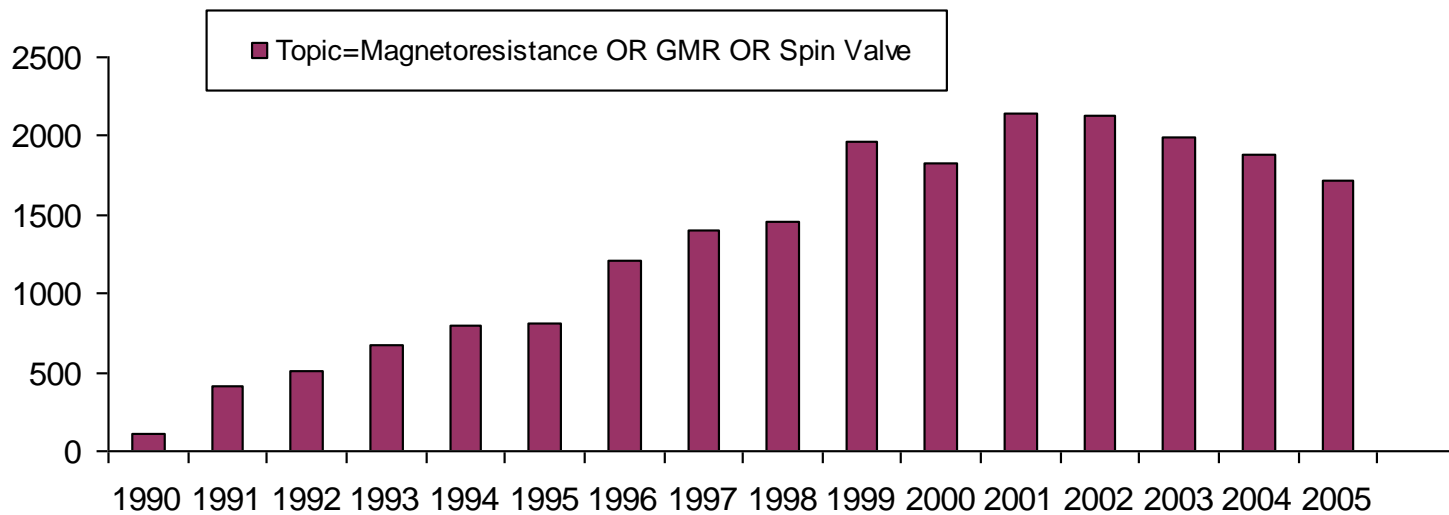
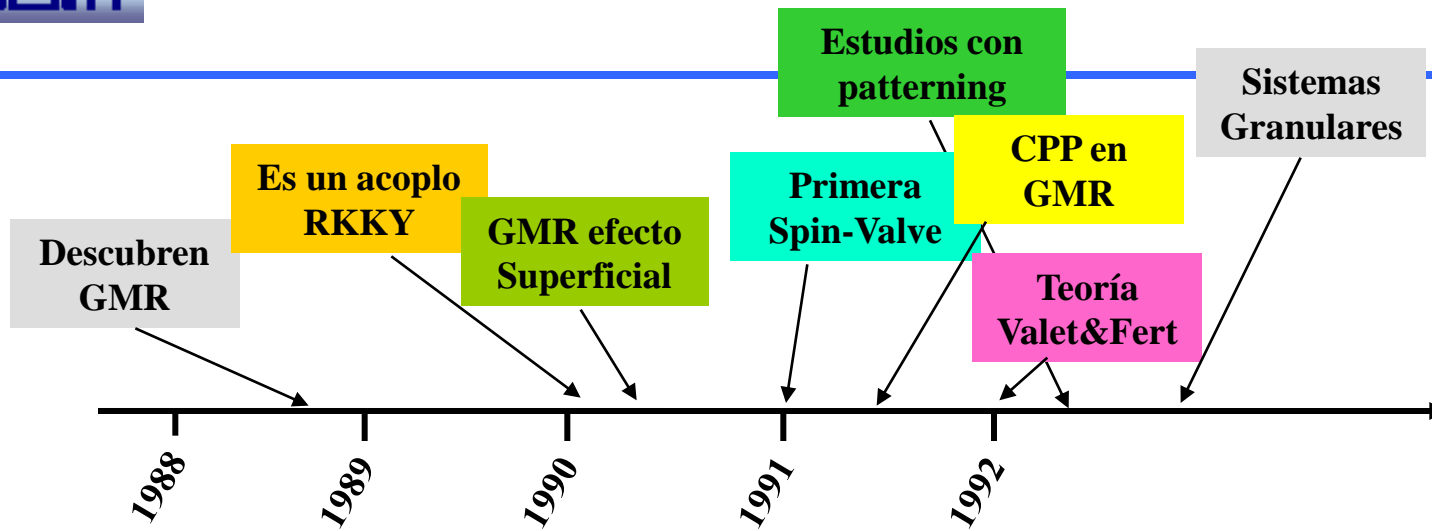
1991: 1 Gb/in² => Gap 200nm y altura de vuelo 50 nm

2006: 7 Gb/in² => Altura de vuelo 10 nm.
Velocidad de vuelo 50 m/s
Alineación con el track 25 nm

Límite esperado 40 Gb/in²



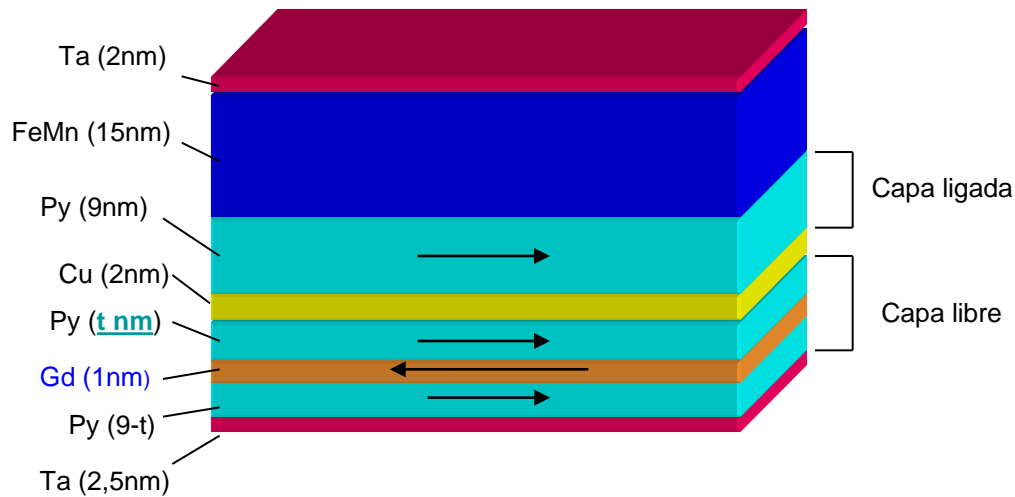




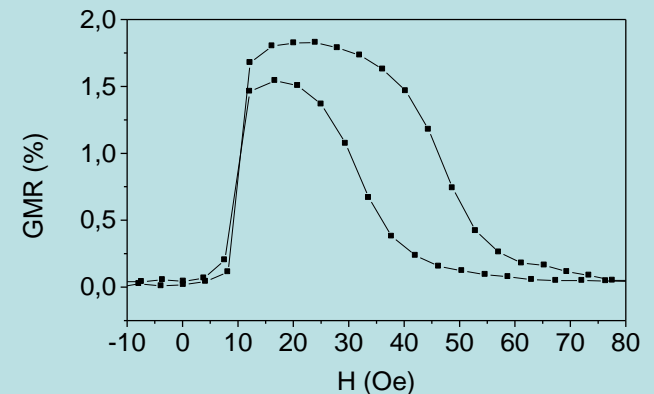
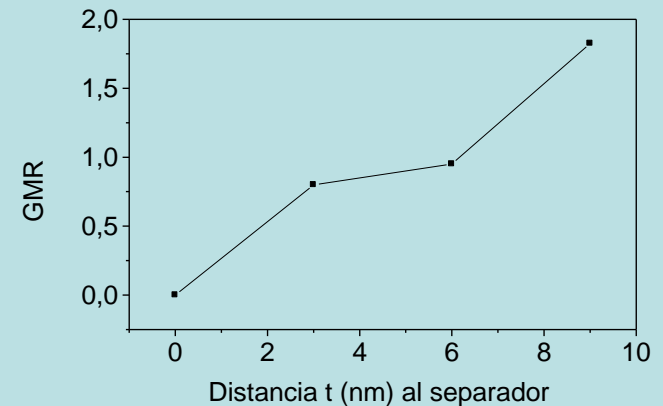
SV con Gd en la capa libre

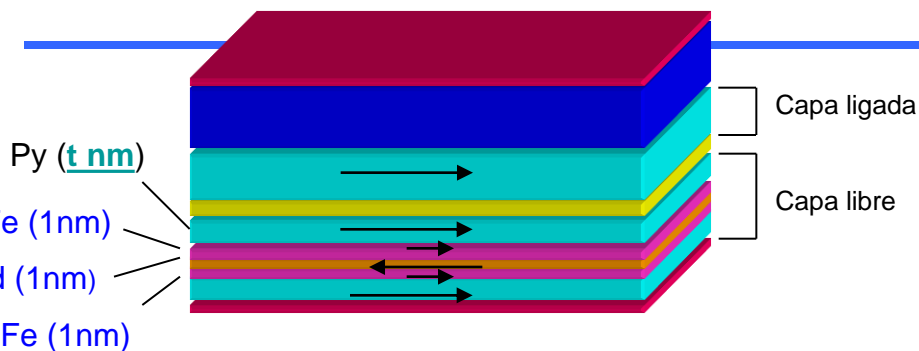
- Estudio de GMR en función de la distancia del Gd al espaciador no magnético (t)

SiO₂// Ta (2,5 nm)/ Py (9-tnm)/ Gd (1nm)/ Py (t nm)/ Cu (2nm)/ Py (9nm)/ FeMn (15nm)/ Ta (2nm)



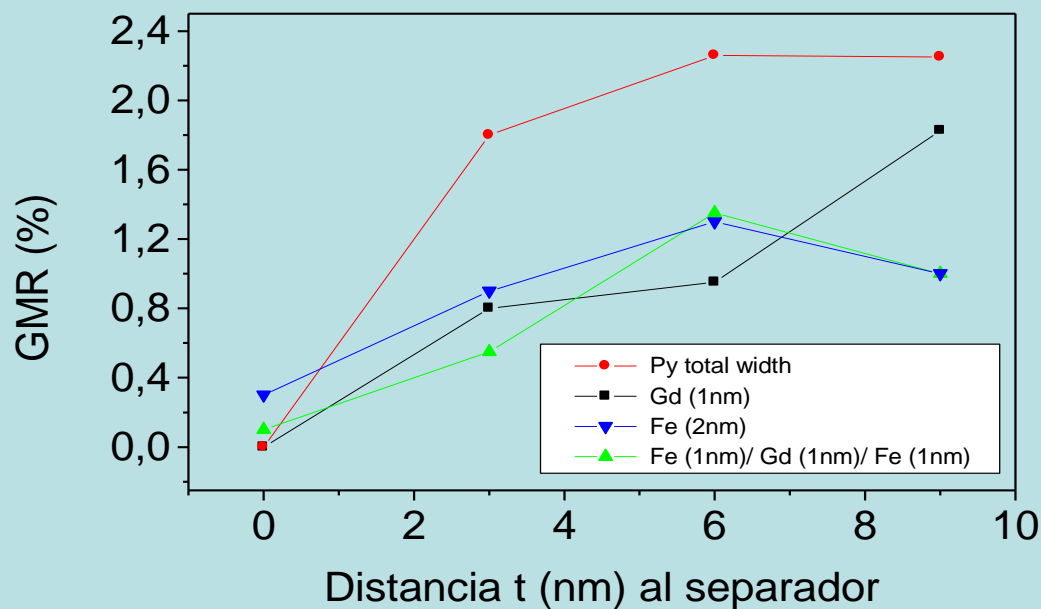
- ¿Estará el Gd actuando como 'espejo'?
 - Configuración CIP
 - $\rho_{\text{Gd}} > 2\rho_{\text{Py}}$

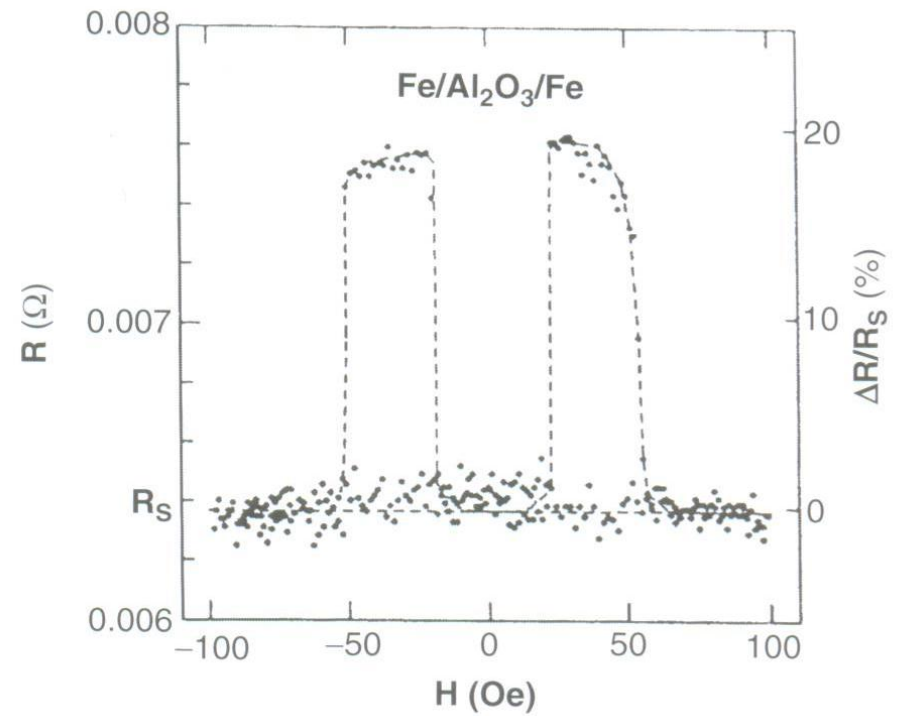
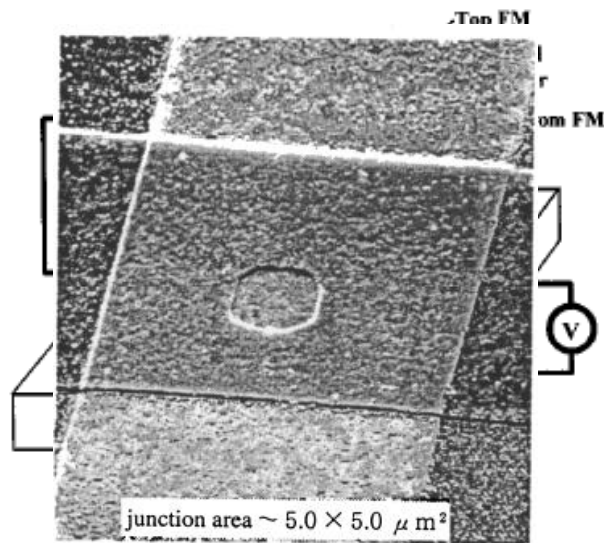
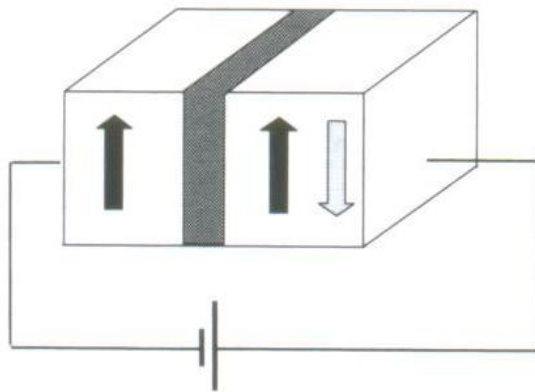


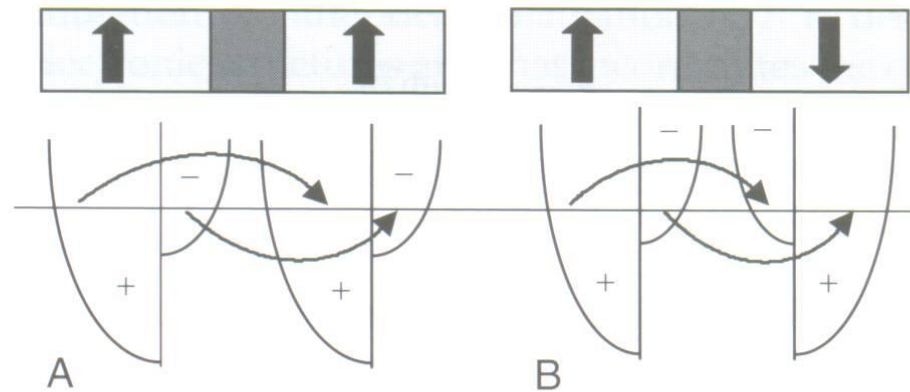


- La difusión no parece tener una gran importancia en la GMR de las SV (si es que realmente la estamos evitando)

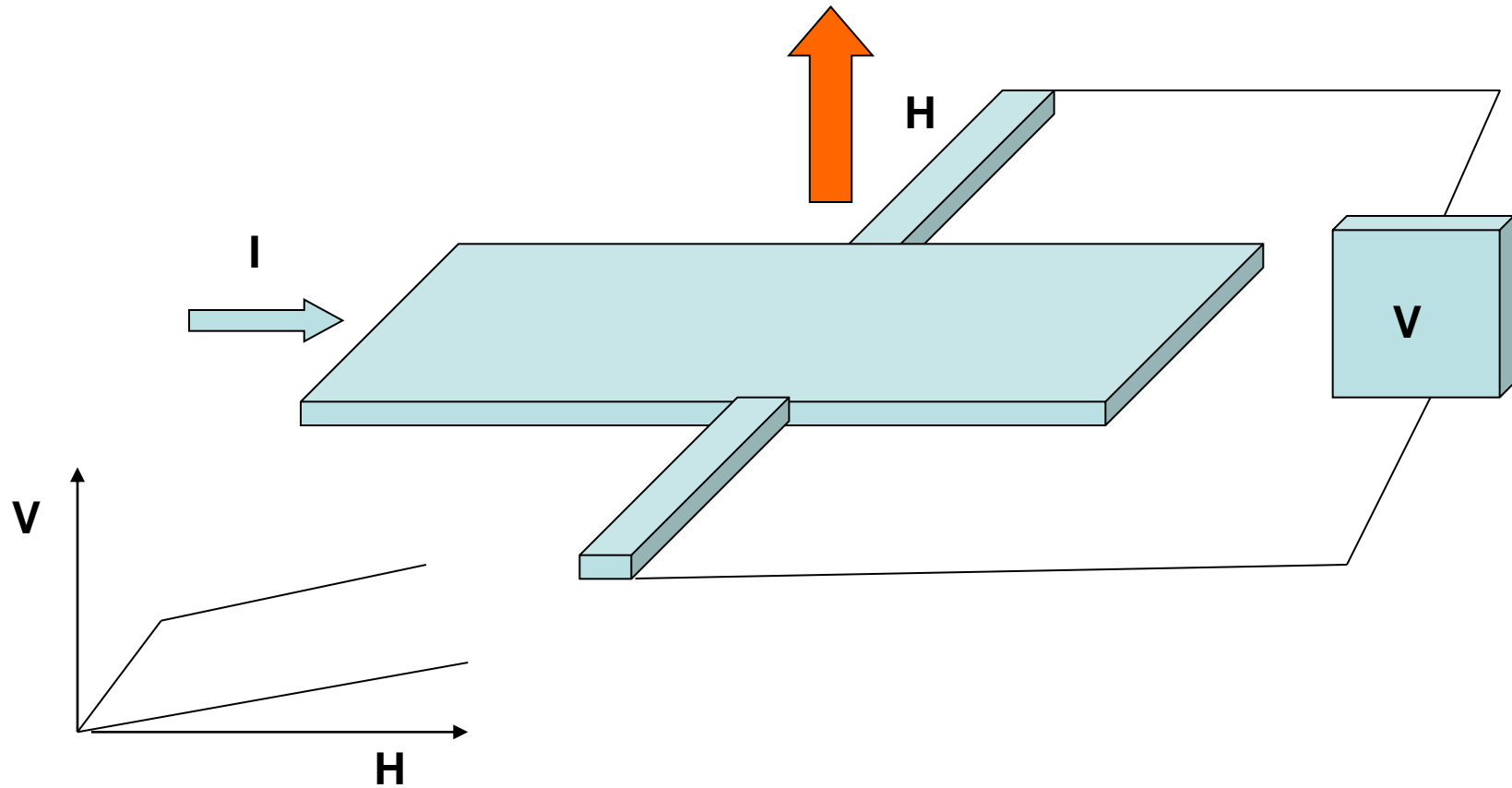
SiO₂// Ta (2,5 nm)/ Py (9-tnm)/ Fe (1nm)/ Gd (1nm)/ Fe (1nm)/ Py (t nm)/ Cu (2nm)/ Py (9nm)/ FeMn (15nm)/ Ta (2nm)

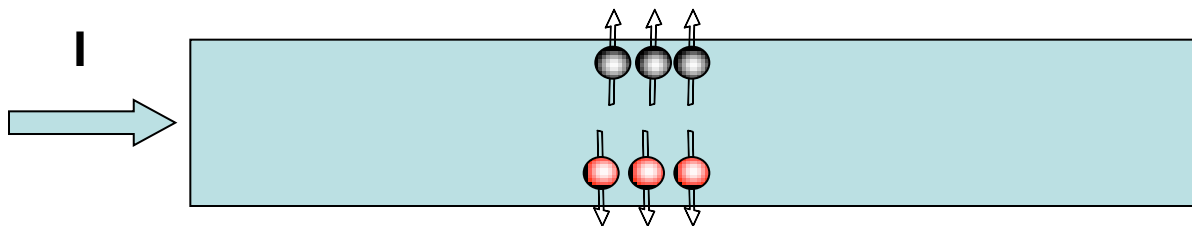
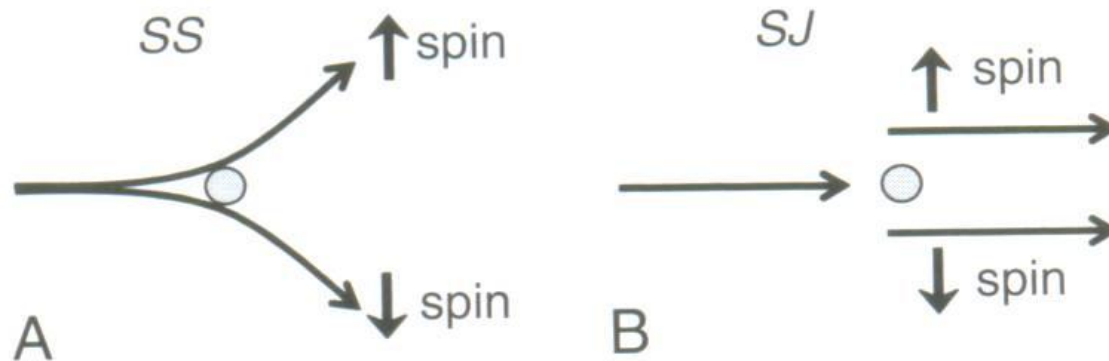


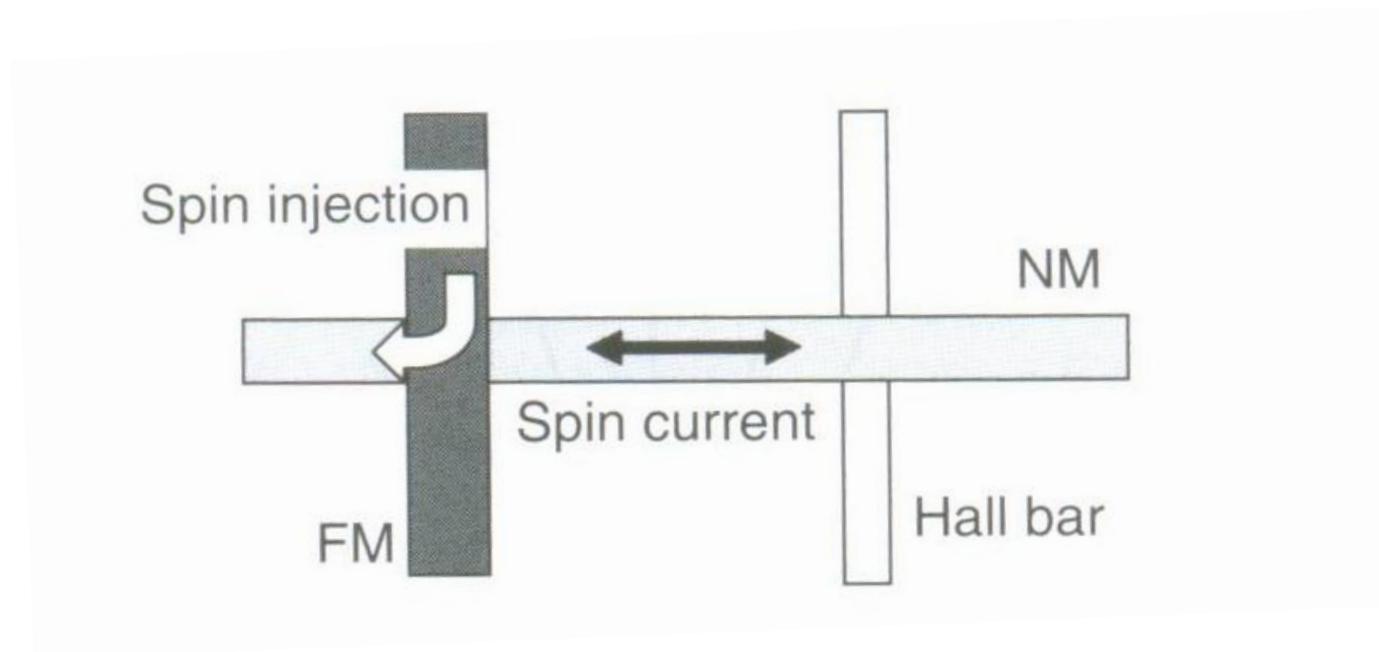


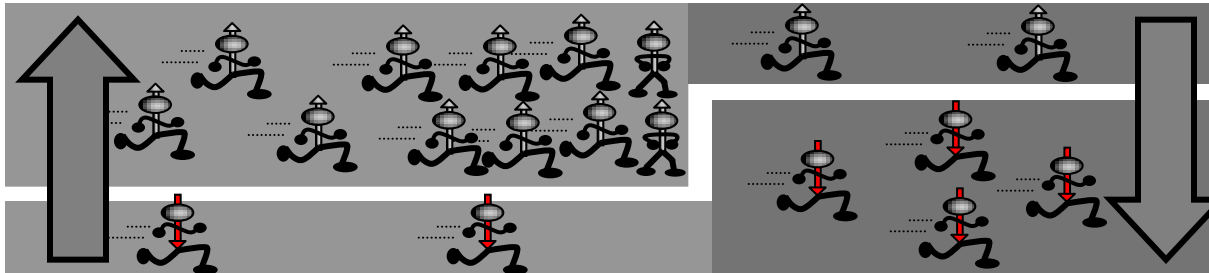
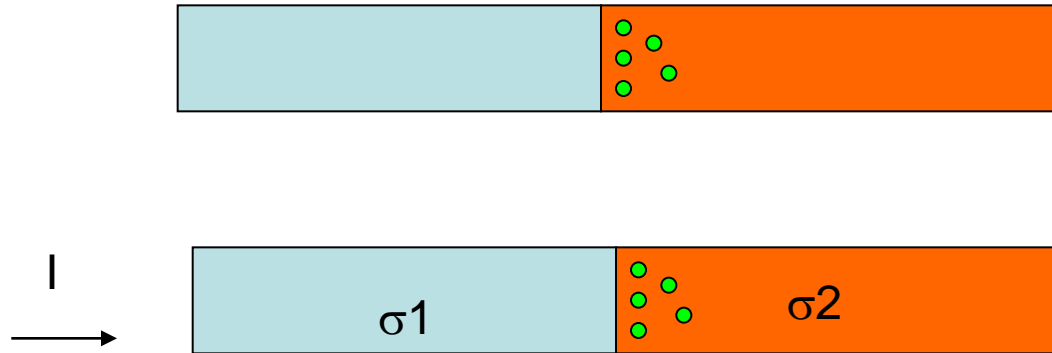


25 A schematic figure to show the tunnelling process in ferromagnetic tunnels.

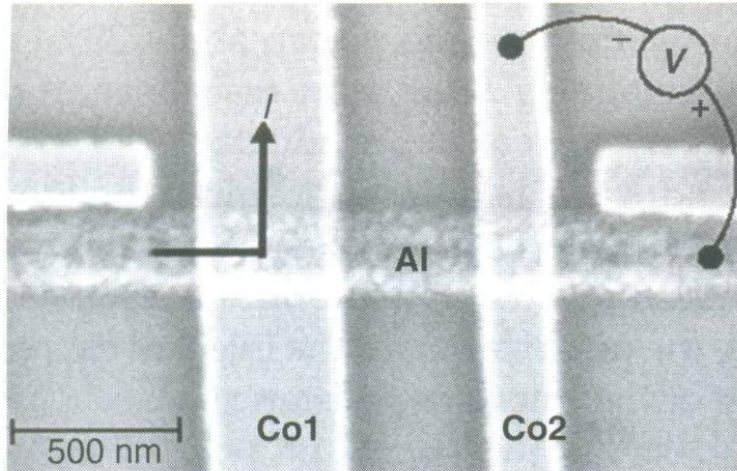




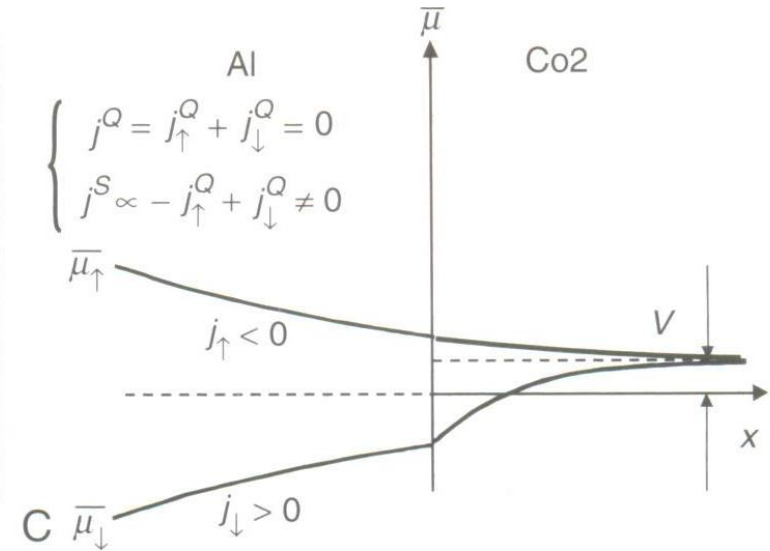




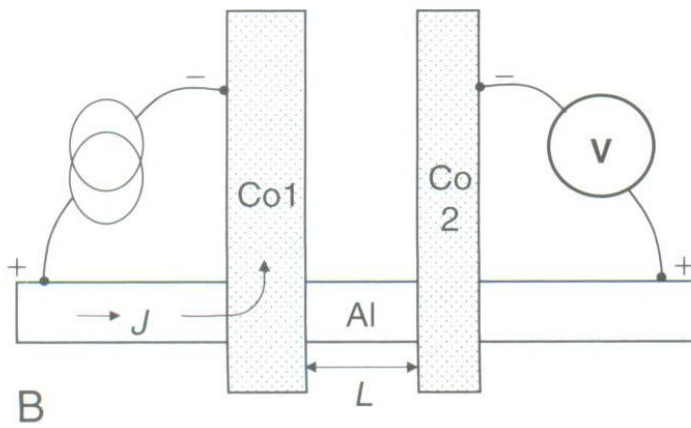
Una interfaz ferromagnética
entre estados antiparalelos
provoca acumulación de spin y
por tanto MR



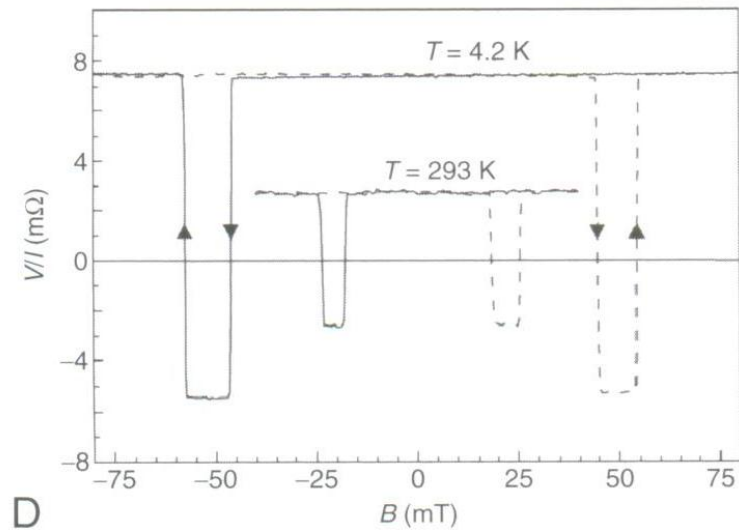
A



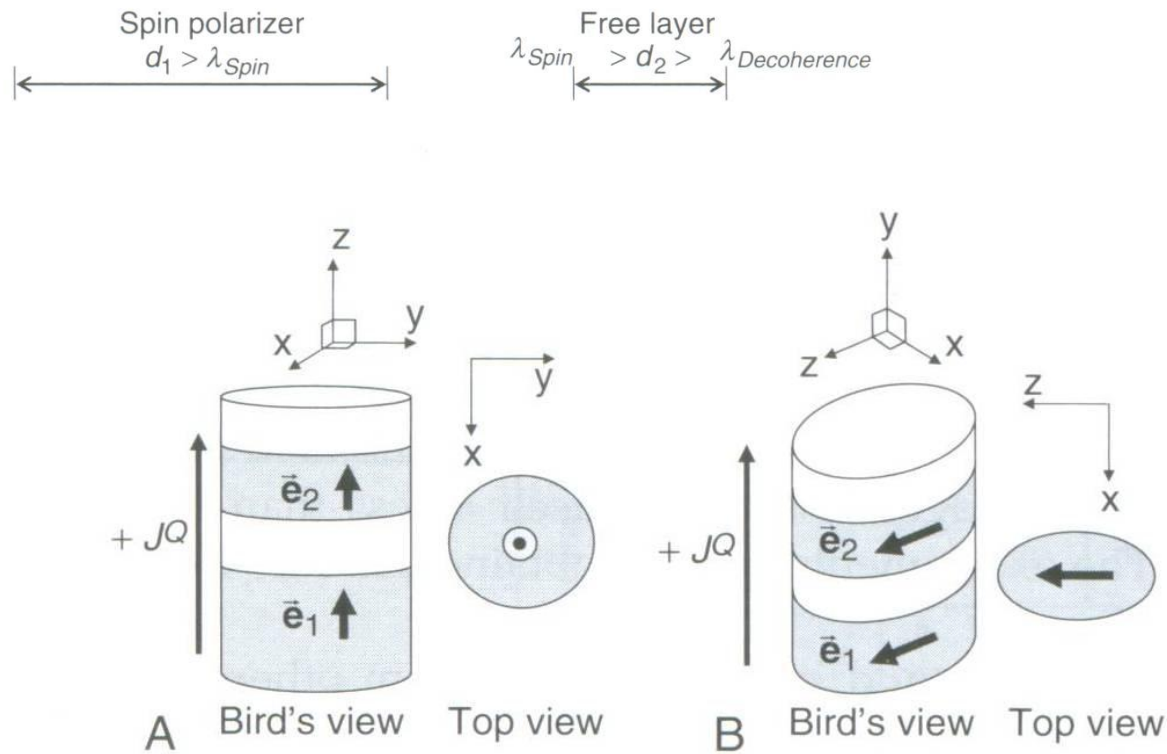
C

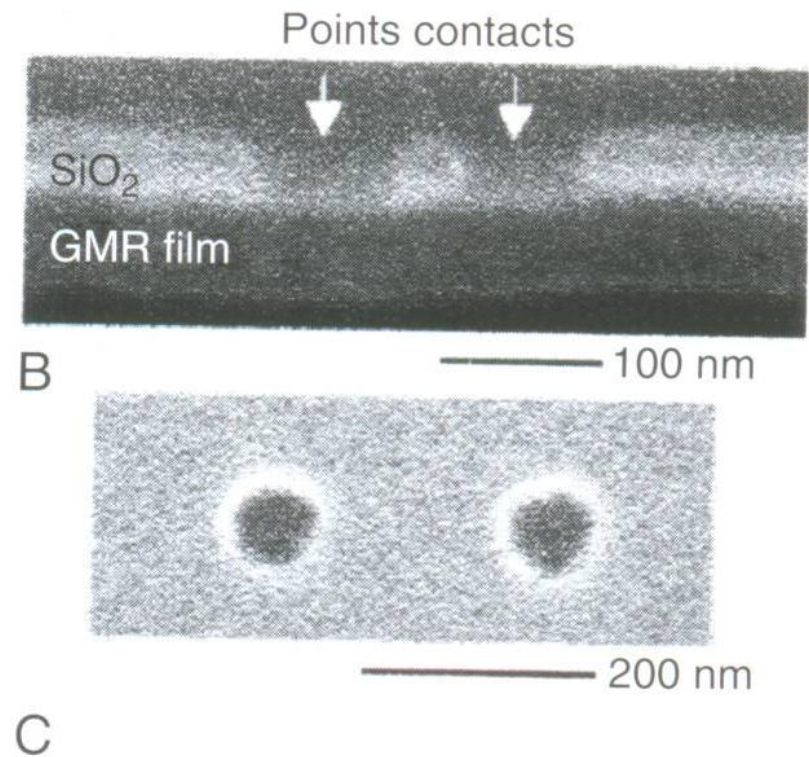
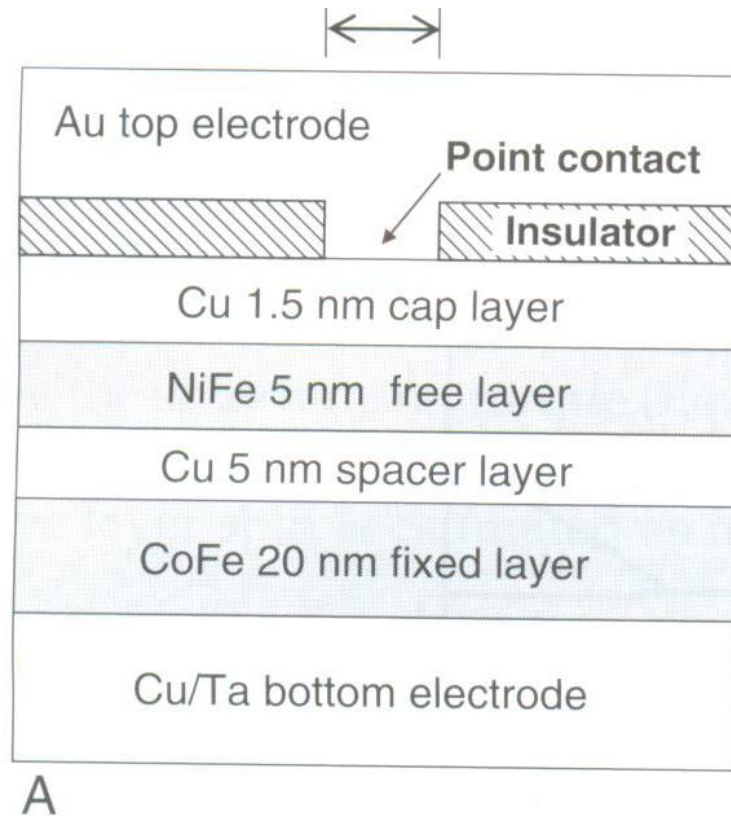


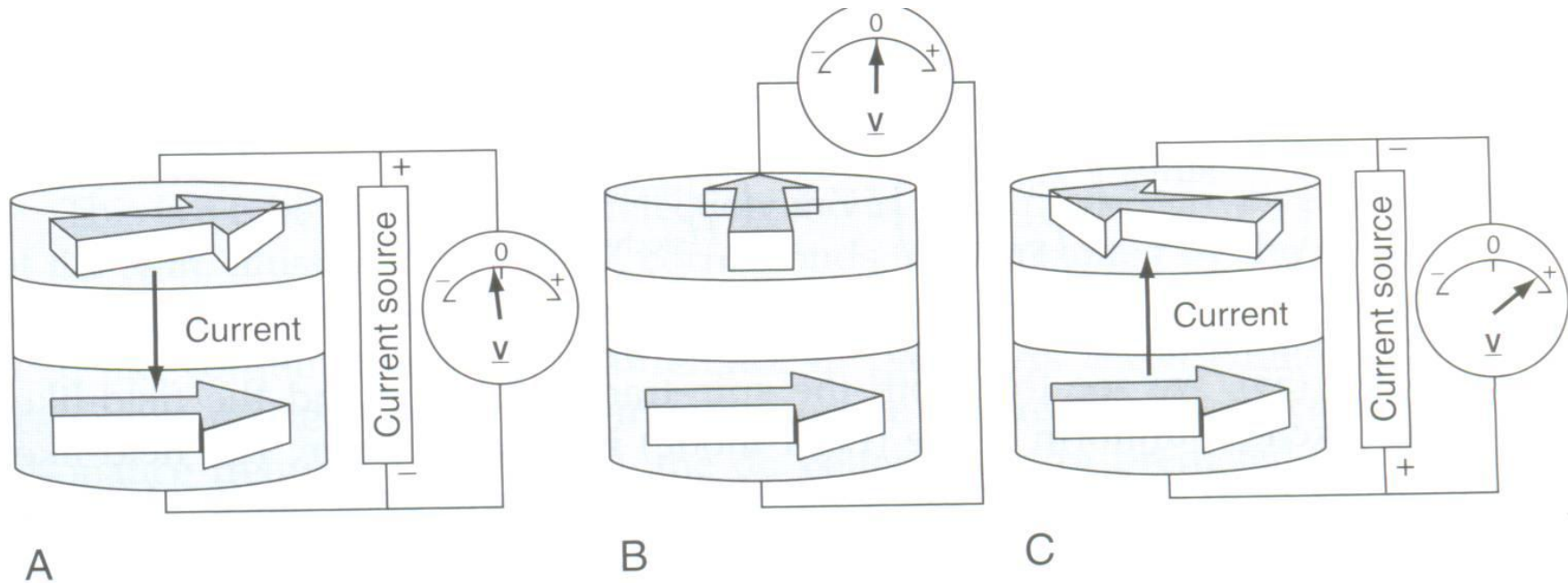
B



D





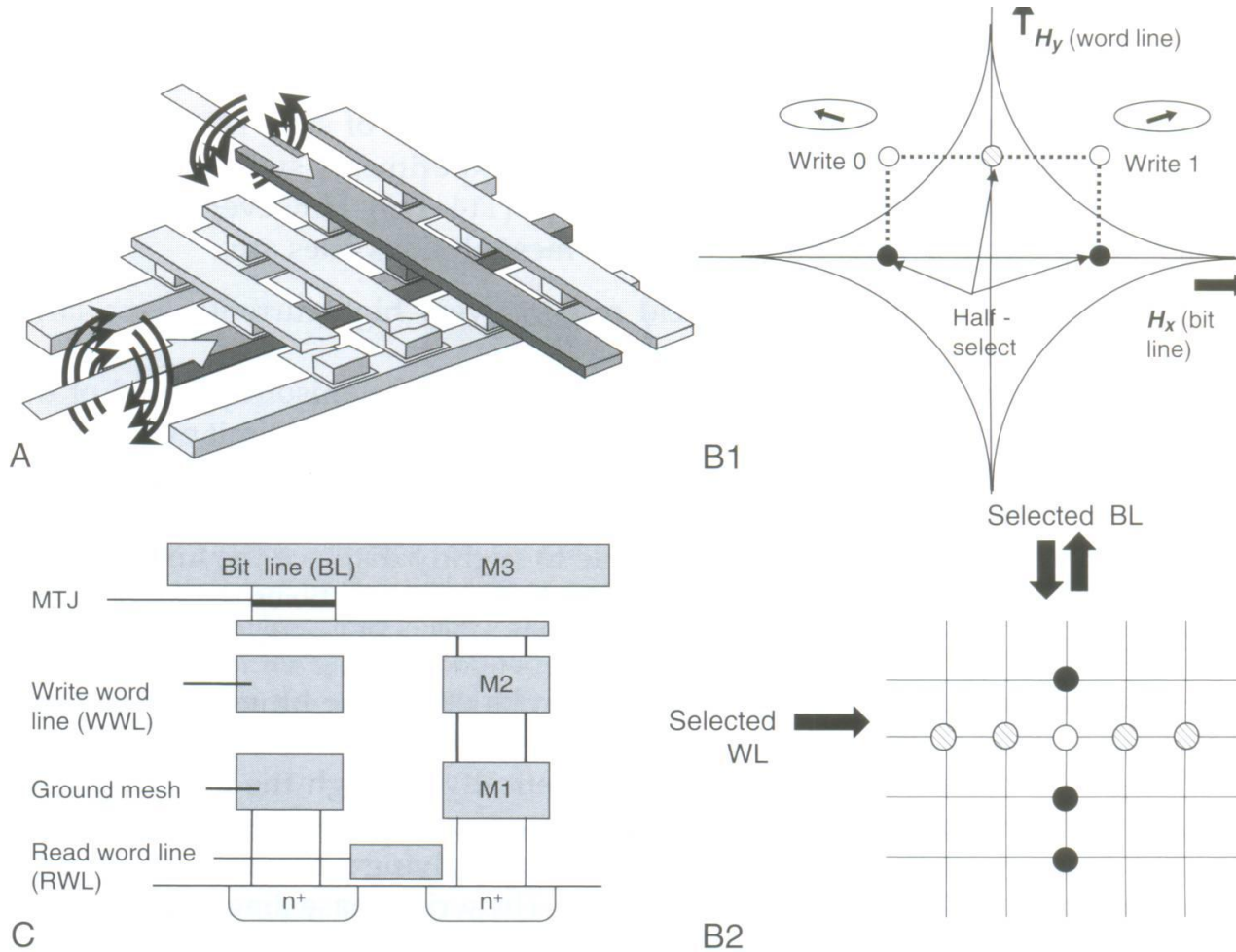


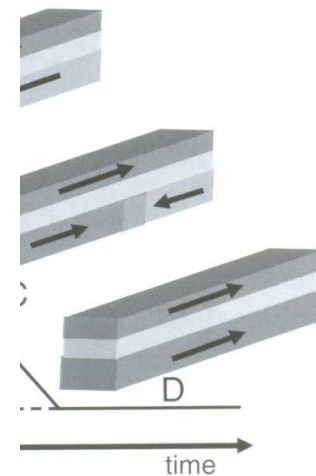
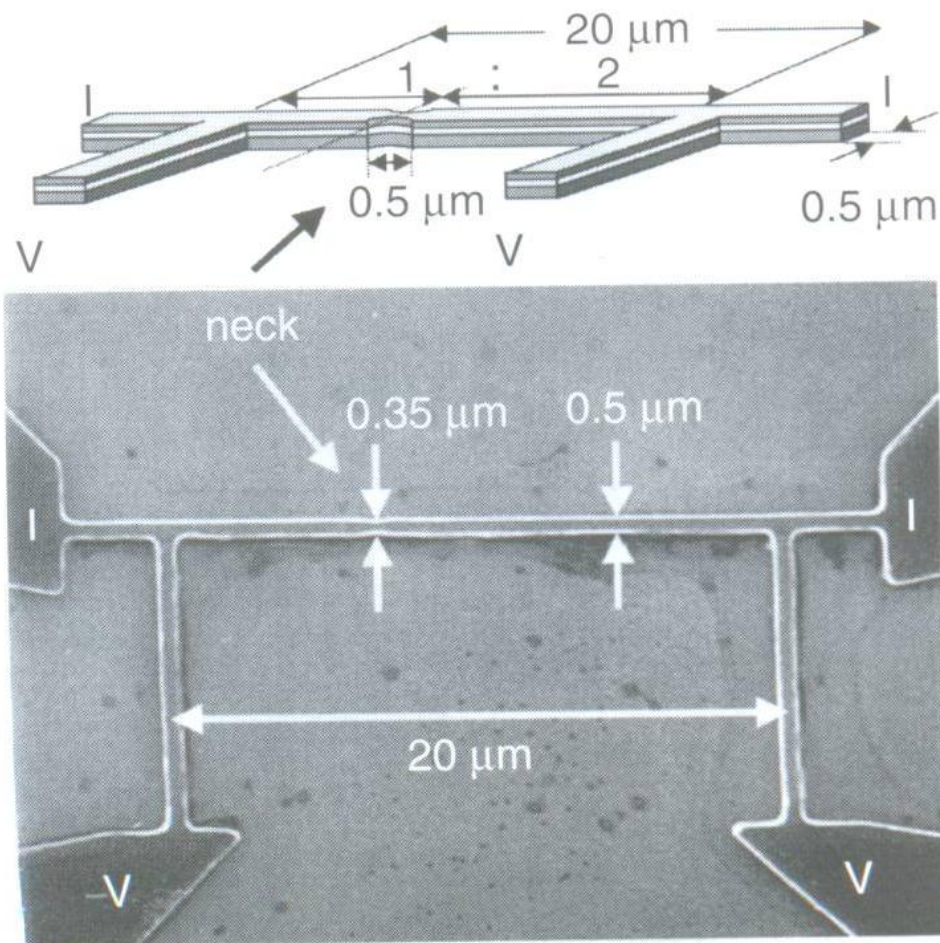
TRANSFERENCIA DE SPIN

STO's (Spin Transfer Oscillators). Potencial futuro

Utilización de los STO's para comunicación “intrachip”

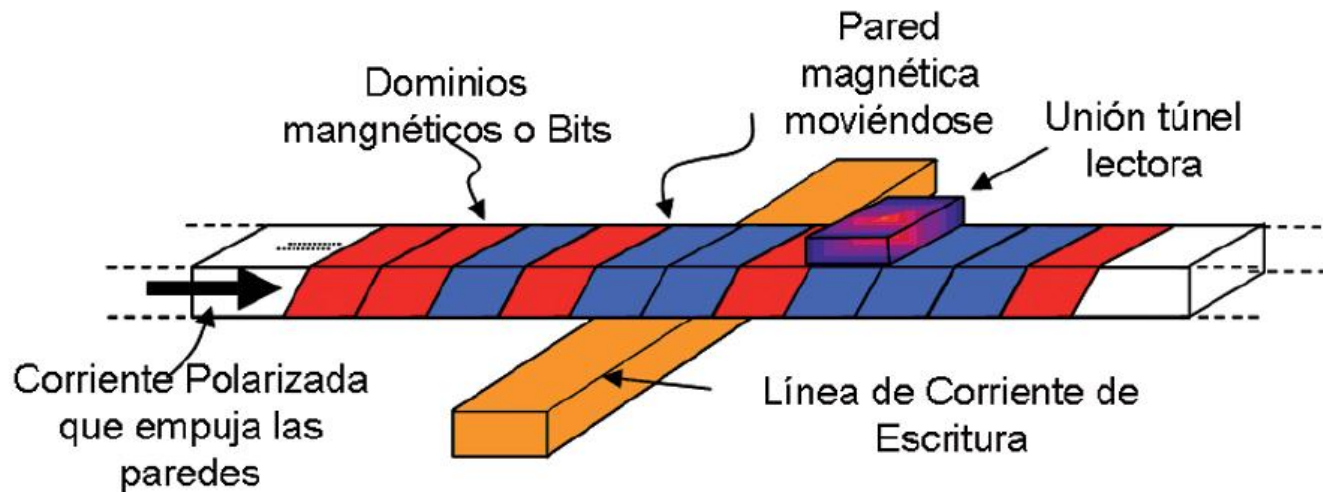
- ☺.- Osciladores de tamaño nanométrico ($r \sim 100\text{nm}$) que emiten a GHz
- ☺.- La frecuencia de emisión se puede sintonizar con la corriente
- ☺? .- Factor de calidad alto $Q \sim 10^3$ (Osciladores de cuarzo $\sim 10^4$)
- ☹ .- Potencia emitida baja $P \sim 0.1\text{nW}$
- ☹ .- Requiere campo magnético superpuesto para emisión.





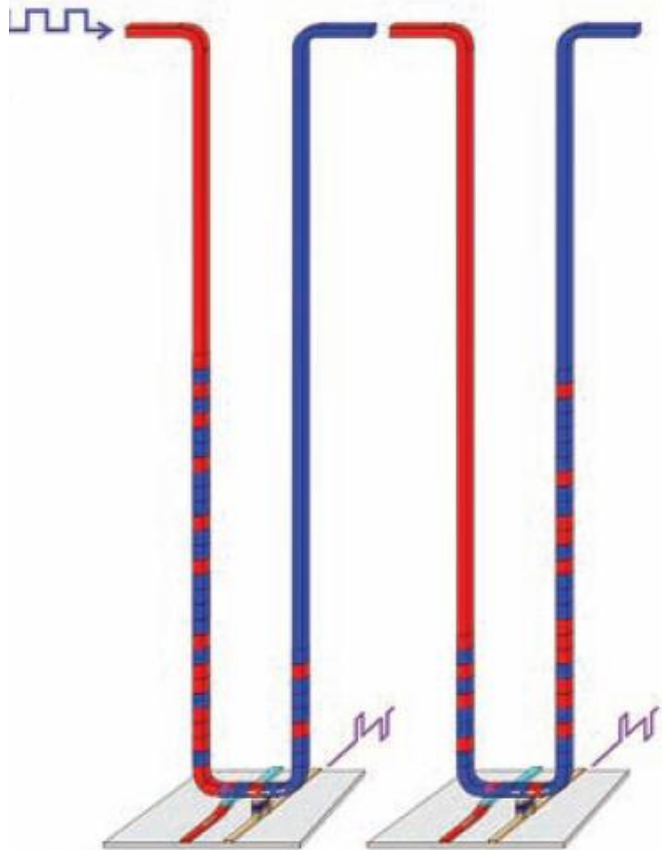
TRANSFERENCIA DE SPIN EN PAREDES

MEMORIA “RACE-TRACK”



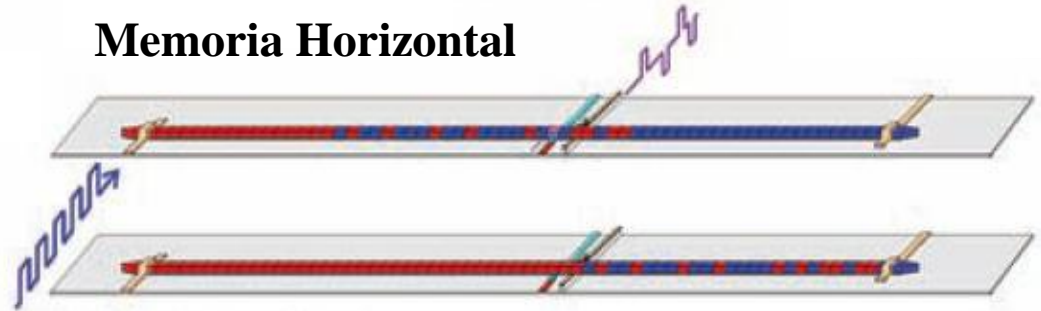
- Memoria sin partes móviles
- Movimiento secuencial de los bits “empujados” por corriente polarizada
- Escritura con el campo de dispersión de una pared de dominio

CONCEPTO GENERAL

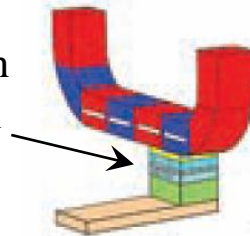


Memoria Vertical

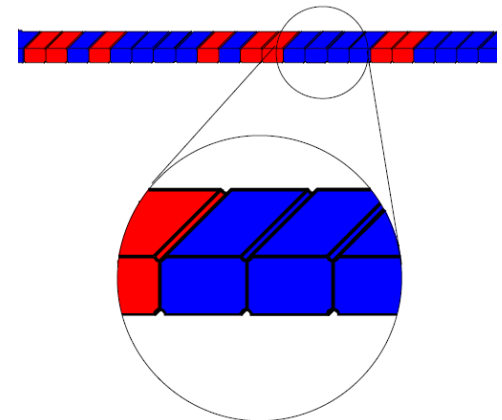
Memoria Horizontal



Unión
Túnel

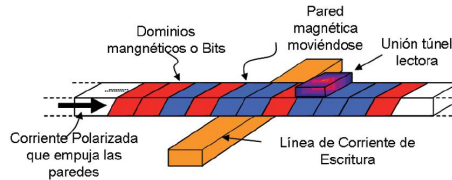


Lectura de bits



**Puntos de anclaje
para las paredes**

TRANSFERENCIA DE SPIN EN PAREDES



MEMORIA “RACE-TRACK”

Valores típicos para mover una pared

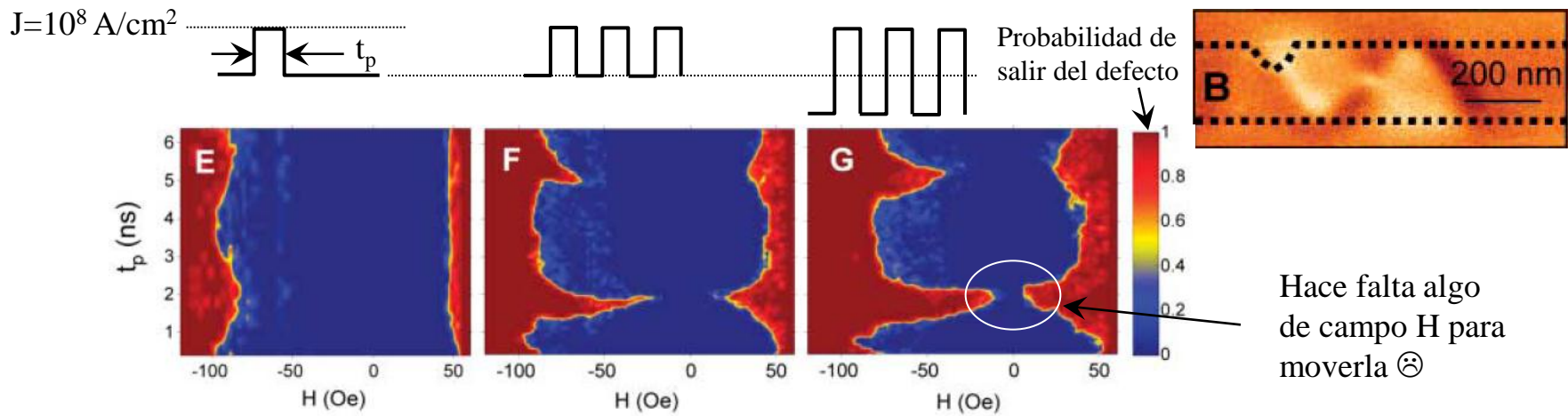
Densidad de corriente típica $J \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$

Record $J \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ Laribi et al. APL 90, 232505 (2007) en FeCoB

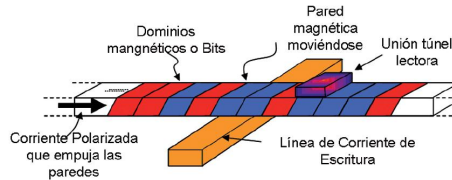
Estimación para ser rentable $J < 10^5 \text{ A/cm}^2$

¿Solución en pulsos muy cortos? $\sim \text{ns}$ → Probabilidad de mover la pared

Thomas et al. Science 315, 1553 (2007)



TRANSFERENCIA DE SPIN EN PAREDES



MEMORIA “RACE-TRACK”

Valores típicos para mover una pared

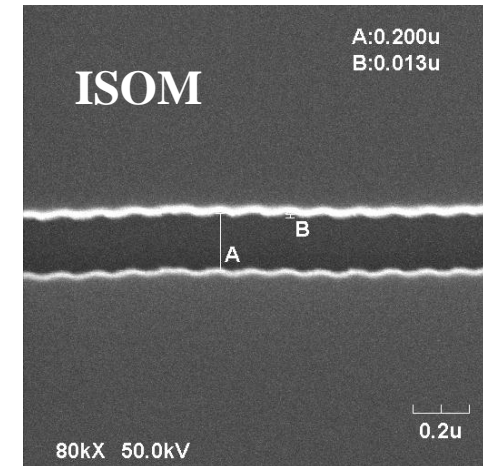
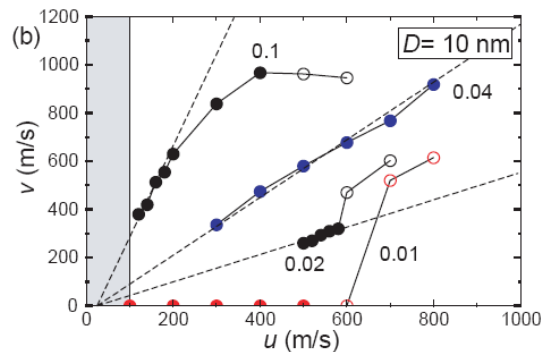
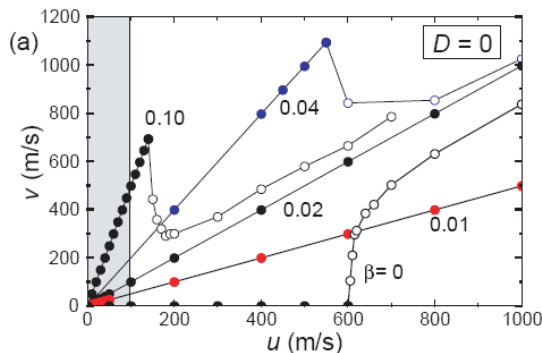
Velocidad de una pared en nanohilos entre **100 m/s y 1000 m/s**

→ **Si Bit~1μm → 1 Gb/s sólo en un registro de desplazamiento! ☺**

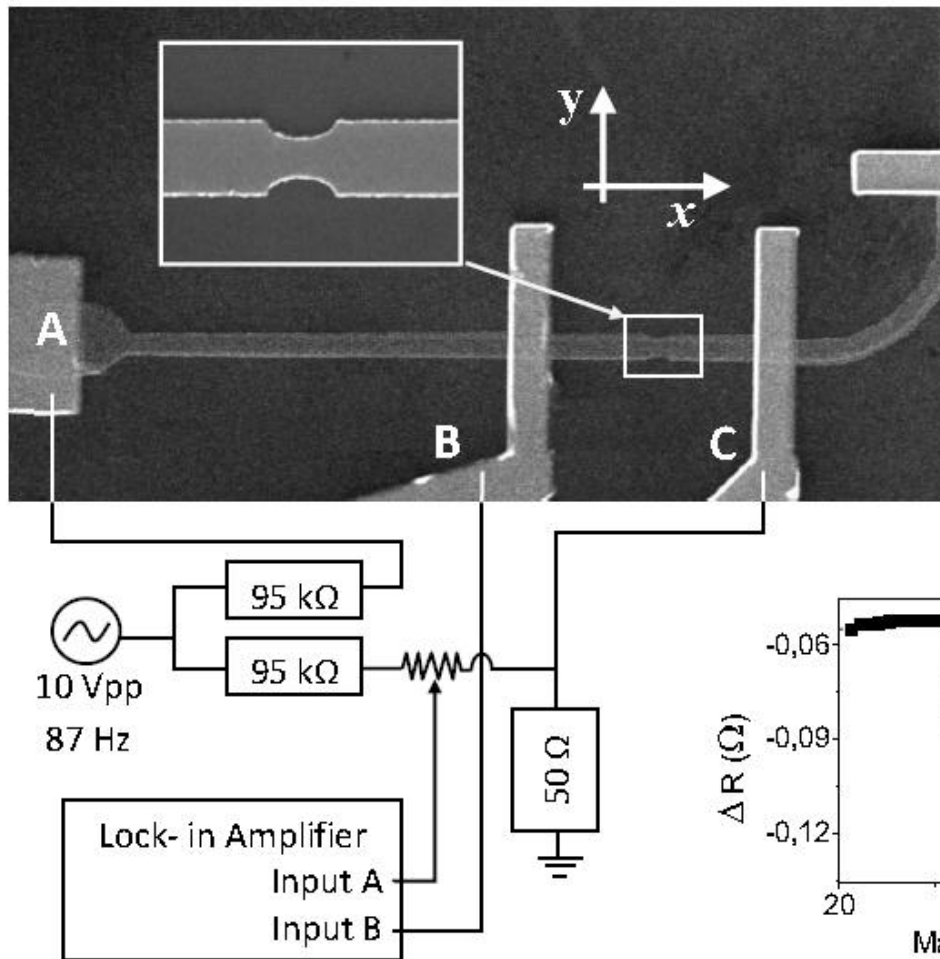
(En Discos actuales de 10000 rpm, “bit transfer” ~ 1Gb/s)

MÁS RÁPIDO EN HILOS RUGOSOS!

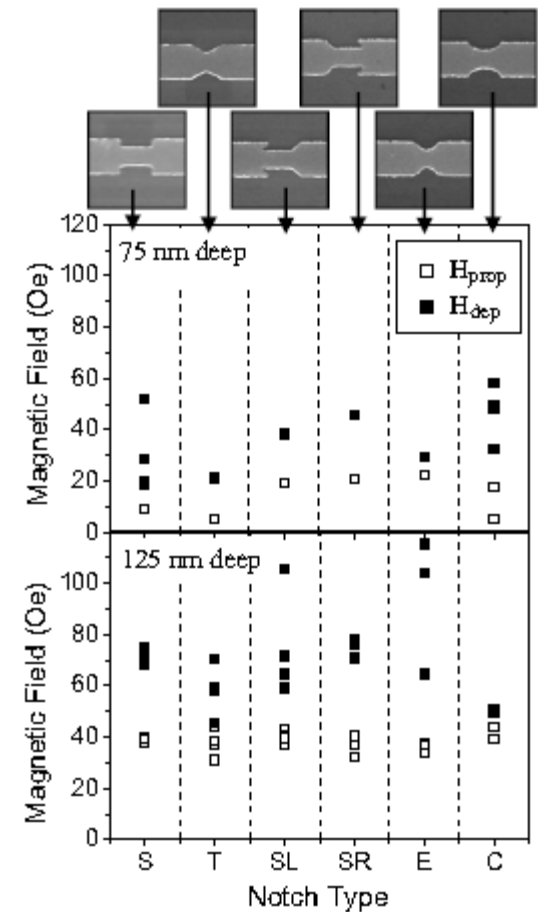
Nakatani et al. Nature Materials 2, 521 (2003)



Stochastic nature of the domain wall depinning in permalloy magnetic nanowires



STOCHASTIC NATURE OF THE DOMAIN WALL ...



PHYSICAL REVIEW B **82**, 064426 2010

